

Resumen

En aplicaciones como la conformación en frío, se utilizan materiales específicos para las herramientas como aceros rápidos y metales duros recubiertos con capas cerámicas. En este contexto, la prevención de aparición de grietas en los útiles podría constituir el criterio a seguir ya que el inicio de dicho daño puede ser crítico en condiciones de fatiga. Por ello, es necesario conocer las condiciones límite de trabajo de estos materiales para optimizar la vida útil de las herramientas.

Los ensayos por impacto y los ensayos por contacto esférico o Hertziano, que generan un campo de tensiones similar, permiten simular las sollicitaciones mecánicas reales que encuentran las herramientas durante servicio. Además, son ensayos de aplicación sencilla y que requieren de poco volumen de material.

El objetivo de la presente investigación es estudiar la respuesta mecánica bajo contacto esférico monotónico y cíclico de un metal duro (calidad referida como 10F) recubierto con TiN o WC/C y con textura superficial inducida por láser.

Los ensayos bajo sollicitaciones monotónicas se realizan mediante indentadores de diámetros 2,5 y 5 mm. Por otra parte, los ensayos cíclicos se llevan a cabo con un indentador de 2,5 mm de diámetro, variando el número de ciclos desde 10^3 hasta 10^6 ciclos. Este análisis mecánico se complementa con una inspección detallada del daño generado en superficie.

Los resultados experimentales obtenidos muestran que:

- La presencia del recubrimiento en los sistemas parece afectar sensiblemente a la respuesta al contacto esférico monotónico del material base como ente individual.
- El daño por fisuración aparece siempre para valores de tensión de contacto superiores al límite elástico, por lo que existe siempre cedencia plástica o cuasi-plástica previa a la generación de grietas.
- Bajo condiciones de fatiga, existe fisuración para tensiones inferiores a la tensión crítica monotónica, hecho que implica que ambos sistemas son sensibles a fatiga.



Índice

RESUMEN	1
ÍNDICE	2
1 INTRODUCCIÓN	5
2 OBJETIVOS	6
3 ESTADO DEL ARTE	7
3.1 Introducción	7
3.1.1 Materiales con recubrimiento	7
3.1.2 Daño por contacto tribomecánico del recubrimiento	8
3.1.3 Recubrimientos duros actuales	9
3.1.4 Componentes recubiertos	13
3.1.5 Evaluación de los materiales recubiertos: parámetros importantes	13
3.2 Textura superficial mediante láser	14
3.2.1 Introducción	14
3.2.2 Función de la textura superficial	15
3.2.3 Textura superficial por láser	17
3.2.4 Parámetros del láser	18
3.3 Comportamiento de recubrimientos duros bajo solicitaciones de impacto	19
3.3.1 Fatiga por contacto en sistemas sustrato–recubrimiento	20
3.3.2 Modos de daño en recubrimientos cerámicos	21
3.3.3 Contacto Hertziano: tensión y deformación de indentación esférica	23
3.4 Tribología	25
4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	27
4.1 Material empleado	27
4.2 Indentación esférica monotónica	30
4.3 Indentación esférica cíclica	31
4.4 Ensayos de tribología	32
5 RESULTADOS Y DISCUSION	34
5.1 Indentación esférica monotónica	34
5.1.1 Curvas P_0 vs a/r	34
5.1.2 Determinación del límite elástico	41
5.1.3 Identificación del daño por contacto esférico	44
5.2 Fatiga por contacto esférico	46



5.2.1	Indentación por contacto esférico cíclico	46
5.2.2	Determinación de las curvas P vs N y p_0 vs N.....	49
5.2.3	Determinación del límite a fatiga.....	55
5.2.4	Determinación de la sensibilidad a fatiga	56
5.3	Tribología	60
6	CONCLUSIONES	61
7	AGRADACIMIENTOS	63
8	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	65
9	ANEXOS	67
9.1	Impacto medioambiental.....	67
9.2	Coste general del proyecto	69





1 Introducción

En aplicaciones como la conformación a baja temperatura, donde se utilizan ampliamente materiales específicos de herramientas como aceros rápidos y metales duros, la necesidad de reducir o eliminar el uso de lubricantes y alargar la vida útil de los componentes ha conducido a la utilización de varios recubrimientos, en particular cerámicos, y técnicas de texturación superficial. En este contexto, los recubrimientos más empleados son los nitruros (TiN, TiAlN, CrN), carburos (TiC, WC/C) y óxidos como la alúmina. Sin embargo la implementación de estos sistemas requiere especial estudio y atención dado que las capas cerámicas depositadas pueden provocar fallos prematuros en los sistemas.

En las aplicaciones citadas, donde la prevención de aparición de grietas podría constituir el criterio a seguir ya que el inicio de dicho daño puede ser crítico en condiciones de fatiga, es necesario conocer las condiciones límite de trabajo de estos materiales para optimizar la vida útil de estas herramientas. Desde este punto de vista son de particular interés los estados tensionales impuestos en estos sistemas debidos a cargas concentradas, por contacto o impacto. Estas cargas suponen el caso más crítico ya que las tensiones locales pueden alcanzar valores muy altos para cargas aplicadas relativamente bajas.

El estudio de la respuesta mecánica de materiales bajo sollicitaciones de contacto requiere de ensayos no normalizados. En este sentido, el ensayo por contacto Hertziano es muy sencillo y reproducible ya que simula las sollicitaciones mecánicas reales de estos sistemas en ciertas aplicaciones. Dicho ensayo se puede aplicar para casos concretos de mecánica de fractura y análisis de daño y es muy representativo en una amplia gama de configuraciones.

En concordancia con las ideas expresadas anteriormente, el objetivo de la presente investigación es estudiar la respuesta mecánica bajo contacto esférico monotónico y a fatiga de diferentes sistemas sustrato-recubrimientos duros con textura superficial inducida por láser. Para ello, se prestará especial atención a la identificación de los modos de daño de los conjuntos estudiados así como a la determinación del criterio de aparición del daño crítico.



2 Objetivos

Los principales objetivos que se pretenden conseguir con el desarrollo de este proyecto final de carrera son:

- Identificar los distintos modos de daño por contacto esférico en dos sistemas sustrato – recubrimiento duros con textura superficial inducida por láser.
- Determinar las curvas tensión - deformación de indentación de dichos sistemas para su caracterización mecánica y posterior comparación con la respuesta del sustrato y de los sistemas recubiertos sin textura superficial.
- Establecer el criterio de aparición de daño crítico por contacto esférico monotónico en estos sistemas y la carga o tensión crítica monotónica de aparición de dicho daño.
- Evaluar la influencia de la fatiga por contacto esférico sobre la aparición de este daño crítico y comparar los resultados obtenidos con la respuesta correspondiente a los sistemas sin textura superficial.
- Determinar el comportamiento tribológico de dichos sistemas.



3 Estado del arte

3.1 Introducción

3.1.1 *Materiales con recubrimiento*

En el desarrollo de nuevos materiales, a veces se combina distintos materiales con propiedades diferentes para lograr uno de compuesto que represente una mejora en la funcionalidad. Existen muchas clases de materiales compuestos, la mayoría de las cuales están orientadas a mejorar las propiedades mecánicas tales como la rigidez, resistencia mecánica, tenacidad y resistencia a la fatiga.

Por otro lado, se hallan materiales compuestos por un sustrato y un recubrimiento que están diseñados para mejorar específicamente las funciones tribológicas, eléctricas, ópticas, químicas y/o magnéticas. En este caso, normalmente se acostumbra a seleccionar un material que proporcione la rigidez, resistencia mecánica, conformabilidad, etc. deseados y posteriormente se modifica o se adiciona otro material en forma de capa superficial o recubrimiento.

El uso de recubrimientos en herramientas y elementos de mecanizado es una forma muy eficiente de disminuir la fricción y aumentar la resistencia al desgaste. Gracias a esto, se puede conseguir incrementar el tiempo de vida de la pieza o componente, además de buscar otros beneficios:

- Mejorar la resistencia al desgaste de una herramienta de corte recubierta permite aumentar la velocidad de corte y, en consecuencia, la productividad.
- Reducir la fricción muchas veces implica disminuir el consumo de energía. En algunos casos, además, una baja fricción puede comportar la eliminación de lubricantes o de etapas de enfriamiento.
- Aumentar o controlar la fricción puede tener un efecto positivo en otras aplicaciones (frenos)
- Diseñar componentes de bajo peso usando recubrimientos se puede traducir, en el caso de la automoción, en un menor consumo de combustible.



3.1.2 Daño por contacto tribomecánico del recubrimiento

Un recubrimiento tribológico puede fallar prematuramente a causa de la fisuración y/o delaminación. Es necesario, por tanto, escoger uno que sea capaz de afrontar las condiciones tribológicas de una aplicación dada y los mecanismos de daño superficial que limitan la vida útil del componente. Estos mecanismos de daño pueden dividirse en:

- Daño sin intercambio de material. Esta categoría hace referencia básicamente a la fisuración. Dentro de esta, se puede diferenciar entre grietas radiales, anillo y laterales. Las primeras salen siguiendo el radio de la indentación, las segundas aparecen de manera circular justo fuera del área de contacto y las últimas avanzan por la intercara sustrato – recubrimiento.
- Daño con pérdida de material. La resistencia al desgaste de un componente recubierto viene determinada principalmente por el recubrimiento siempre y cuando éste cubra el área de contacto. Tan pronto como el recubrimiento se desgasta y el sustrato esté expuesto a causa de la fisuración y/o delaminación, la resistencia al desgaste del sustrato se tornará en un factor importante.

En términos generales, hay dos categorías de desgaste: el desgaste donde existe descohesión sustrato – recubrimiento (daño adhesivo) y el desgaste provocado por el daño en la subsuperficie del sustrato o por la pérdida gradual de material del recubrimiento (daño cohesivo). Este último caso normalmente implica una leve abrasión, erosión, disolución, etc., mecanismos muy similares a aquéllos que se encuentran en el desgaste de materiales homogéneos.

- Daño con recogida de material. La existencia de material de trabajo localmente adherido a la superficie de la herramienta se traduce en indentaciones y rayas en la superficie del producto, problema que evidentemente no es exclusivo de piezas con recubrimiento. Con el propósito de minimizar este hecho, la superficie de la herramienta tiene que ser lisa y se debe reducir la afinidad química entre las dos superficies de contacto. Esto último se consigue con la elección del recubrimiento más adecuado.



3.1.3 Recubrimientos duros actuales

Las aplicaciones tribológicas de los recubrimientos están relacionadas con su temperatura de deposición, que puede ir desde temperatura ambiente hasta más de 1000 °C. Cabe destacar, por tanto, que los métodos que suponen una temperatura elevada de deposición pueden implicar transformaciones de fase, ablandamiento o cambios de dimensiones no deseados de los componentes recubiertos.

Dos de las técnicas de deposición más empleadas son CVD (*Chemical Vapour Deposition*) y por PVD (*Physical Vapour Deposition*), ya que ofrecen una gran flexibilidad en cuanto a composición y estructura de los recubrimientos. Las películas más comunes depositadas mediante estas técnicas son nitruros (TiN, CrN, etc.), carburos (TiC, CrC, W₂C, WC/C, etc.), óxidos (alúmina, por ejemplo) o combinaciones de éstos. Además de estos materiales, se debe considerar también el disulfuro de molibdeno (MoS₂), los DLC (*Diamond like Carbon*) y el diamante.

3.1.3.1 Deposición física por vapor (PVD)

A partir de 1980, el *Physical Vapour Deposition* se estableció como un proceso comercialmente viable para la aplicación de recubrimientos duros sobre herramientas realizadas en carburos cementados o aceros rápidos.

En este proceso el recubrimiento es depositado en vacío mediante condensación de un flujo de átomos ionizados o neutros, donde las especies metálicas provienen de diferentes fuentes como: *electron-beam evaporation*, *magnetron sputtering* o *arc evaporation*.

El *ion plating* es una variante del proceso tradicional del PVD, en el que el flujo de átomos e iones es activado por una descarga de plasma, y las especies cargadas son aceleradas hacia el sustrato mediante la aplicación de una polarización negativa sobre este último.

En los recubrimientos duros, los metales evaporados o *sputtered* (titanio, zirconio, wolframio) reaccionan con especies gaseosas (N₂, NH₃, CH₄, C₂H₂) introducidas en la cámara de vacío, para obtener la deposición deseada.



1. Fuente del haz de electrones

2. Argón

3. Gas reactivo

4. Componentes

5. Material de recubrimiento

6. Crisol (ánodo)

7. Descarga de arco de bajo voltaje

8. Bomba de vacío

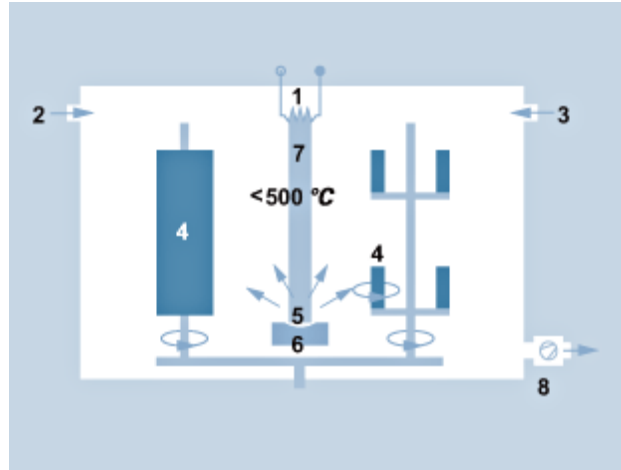


Figura 3.1: Procedimiento de recubrimiento iónico empleado por Oerlikon Balzers-Elay S.A.

Los recubrimientos obtenidos mediante PVD se realizan a bajas presiones, y los átomos acelerados tienen trayectorias libres con menor número de impactos. El PVD permite una línea directa entre el punto de partida del bombardeo y su blanco. Este hecho requiere que el sustrato a depositar se mueva de forma que toda la superficie sea recubierta y de una manera uniforme.

Las características más destacables de esta técnica son la obtención de:

- Capas de pequeño grosor y fácilmente reproducibles
- Recubrimientos con grano fino y no rugosos
- Películas de alta resistencia
- Recubrimientos con bajo coeficiente de fricción

El proceso de PVD posee una serie de ventajas:

- Temperatura de deposición baja (< 500 °C), evitando la formación de grietas en el recubrimiento y obteniendo microestructuras de grano más fino.
- Los recubrimientos obtenidos son menos rugosos y provocan menos calor derivado de la fricción durante el mecanizado.
- Dependiendo de la técnica de deposición, tensiones residuales de compresión



pueden introducirse en el recubrimiento.

- El PVD mejora la resistencia a la fractura transversal del sustrato, mientras que el CVD provoca el efecto contrario.
- El PVD es de fácil aplicación sobre los filos de las herramientas.

3.1.3.2 Recubrimientos TiN

El nitruro de titanio puede ser depositado fácilmente, entre otras técnicas, por PVD sobre una gran variedad de sustratos, obteniéndose un recubrimiento muy duro empleado en herramientas industriales de corte o de conformación.

Depositado por PVD, un recubrimiento de TiN presenta estructura columnar y tensiones residuales internas de compresión (2,5 GPa aproximadamente). Estas últimas reducen el fenómeno de inicio y crecimiento de grietas.

La propiedad más destacable del TiN es su elevada dureza, 30HV, la cual contribuye a su buena resistencia al desgaste. Además, exhibe normalmente una buena adhesión al sustrato y un buen acabado superficial, hecho que le permite mejorar el comportamiento tribológico de los sistemas. Por otro lado, los valores obtenidos en ensayos para evaluar el desgaste abrasivo en el recubrimiento son realmente bajos. En consecuencia, el TiN resulta ser uno de los recubrimientos más adecuados para este tipo de solicitudes.

3.1.3.3 Recubrimientos WC/C

El recubrimiento carburo de wolframio/carbono (WC/C) se usa habitualmente en aplicaciones de ingeniería tales como rodamientos, bombas, compresores, motores y herramientas.

Posee una alta capacidad de deformación, asociada a su estructura columnar, una gran estabilidad química y bajo coeficiente de fricción, lo que combinado con su elevada resistencia al desgaste confiere al recubrimiento unas prestaciones muy interesantes.

Si lo comparamos con uno de los recubrimientos industriales más utilizados y referenciados, el TiN, se puede caracterizar el recubrimiento objeto de este estudio de manera cuantitativa y cualitativa.

La dureza es ligeramente inferior a la del TiN, con unos valores que pueden oscilar entre 1000 y 2000HV. Por otra parte la rugosidad de la capa depositada presenta valores muy superiores a los del TiN. Existe una correlación entre la rugosidad del recubrimiento y el tipo de sustrato y los parámetros del proceso de deposición. Una capa intermedia de cromo y un flujo alto de acetileno, producen capas menos rugosas.



Este tipo de recubrimiento presenta tensiones residuales compresivas, en un rango de 0,5 a 2,5 GPa, aunque menores que en el caso del nitruro de titanio. El flujo del gas en el proceso también condiciona la presencia de las tensiones residuales compresivas. Cuanto mayor sea, más elevadas serán estas últimas.

Se pueden ajustar propiedades del recubrimiento como la dureza, la resistencia mecánica o la resistencia al desgaste a través de los efectos beneficiosos de las tensiones residuales compresivas.

Los recubrimientos de WC/C presentan valores relativamente altos de carga crítica en ensayos de rayado, aunque menores que en los de TiN. El fallo es de tipo cohesivo.

Los valores obtenidos en ensayos para evaluar el desgaste abrasivo en el recubrimiento son tan bajos como los más duros nitruros de titanio. Cuanto más duro sea el recubrimiento mejor responderá a este tipo de desgaste.

En desgaste por deslizamiento contra piezas de acero, la fricción es tan baja como en el caso del TiN. La fricción será menor cuanto mayor sea el contenido en carbono, y menor el de carburos. Las tensiones residuales compresivas mejoraran este comportamiento. Por último, un flujo de acetileno alto en el proceso de deposición minimizará la fricción.

Estudios recientes de O. Wänstrand et al centrados sobre este recubrimiento con capas intermedias de cromo y parámetros muy controlados en el proceso de deposición describen diversos factores para optimizar las prestaciones de las capas depositadas. En la citada investigación, varias capas de WC/C se depositaban sobre un acero rápido, ASP2030 con capas intermedias de cromo de diferentes espesores. El paso previo a la deposición fue una limpieza del sustrato a recubrir. Este proceso se realiza mediante ultrasonidos en tricloroetileno, acetona y alcohol y permite asegurar una adhesión óptima de la capa. La capa de cromo para promover la adhesión se depositó mediante *magnetron sputtering*. Posteriormente, el bombardeo de WC a través de *magnetron sputtering* se simultaneó con la introducción de un flujo de acetileno (C_2H_2) en la cámara de vacío. La temperatura de deposición osciló entre 200 y 250 °C.

Las conclusiones principales de dicha investigación son las siguientes:

- Cuanto más fina sea la capa de cromo, mejores serán las propiedades mecánicas y tribológicas del WC/C.
- Una capa intermedia de WC empeora la calidad del recubrimiento.
- Tensiones residuales compresivas relativamente altas son aconsejadas para la mejora de las propiedades del WC/C.
- Las propiedades mejoran igualmente con un flujo de acetileno alto, lo que



significa que una cantidad relativamente alta de carbono frente a la de carburos resulta positiva.

3.1.4 Componentes recubiertos

En la actualidad, existen dos tendencias en cuanto al desarrollo de herramientas de corte. Una de ellas es conseguir trabajar en seco de modo que se disminuyan los costes y problemas medioambientales asociados a los lubricantes. La otra es alcanzar mecanizar a alta velocidad aceros endurecidos llegando a un acabado superficial de alta calidad tal que las operaciones finales de desbaste o pulido sean innecesarias. En ambos casos, la generación de calor será más significativa, hecho que se traducirá en buscar herramientas con una dureza en caliente y una estabilidad química y térmica mejoradas.

Por otro lado, la aplicación de recubrimientos duros delgados en herramientas de conformación es todavía bastante nueva pero tiene un gran potencial ya que estas herramientas forman parte de un amplio sector industrial. Los motivos por los cuales esto sucede son:

- Las elevadas dimensiones de algunas herramientas, hecho que encarece los procesos actuales de deposición.
- Las complicadas geometrías, que hacen difícil, o incluso imposible, recubrir.
- Las temperaturas utilizadas para depositar, muy elevadas para determinados sustratos.
- El alto coste de las herramientas, hecho que frena la decisión de aplicar nuevos recubrimientos.

3.1.5 Evaluación de los materiales recubiertos: parámetros importantes

Los parámetros de deposición (temperatura del sustrato, características del plasma o flujo, tiempo de ataque, ángulo de incidencia, etc.) y las características del sustrato (composición, microestructura, topografía) determinan las características del recubrimiento (espesor, composición química, microestructura, topografía, etc.). Por otra parte, el sustrato gobierna la nucleación y crecimiento del recubrimiento y, por tanto, determina la topografía de este último. En consecuencia, el sustrato y su preparación superficial desempeñan un



papel muy importante en la topografía y adhesión del recubrimiento y, como resultado, en la actuación de todo el conjunto. Además, las características del recubrimiento fijan las propiedades básicas del mismo –propiedades térmicas, químicas y mecánicas.

En resumen, las propiedades básicas del recubrimiento y las propiedades básicas del sustrato establecen las propiedades tribológicas del sistema, esto es, las propiedades de fricción y la resistencia al daño superficial ocasionado por deformación, abrasión, erosión, contacto adhesivo, impacto repetitivo, etc.

3.2 Textura superficial mediante láser

3.2.1 Introducción

Actualmente, con el propósito de mejorar las propiedades tribológicas y el comportamiento de las herramientas durante servicio, se puede optar por introducir una determinada textura superficial en los materiales que constituyen los útiles. Dicha textura consiste en un cambio controlado de las propiedades de la superficie de un material y puede ser inducida por diferentes procesos (ataque químico, ataque por plasma, fotolitografía, *micro-blasting*, láser...), dependiendo del estado final de superficie esperado o del material considerado. Además, esta textura superficial puede presentarse en forma de diversas geometrías (cavidades esféricas –Figura 3.2- o cuadradas, escalones, etc.), siendo éstas siempre más pequeñas que el área de contacto entre la pieza y la contraparte.



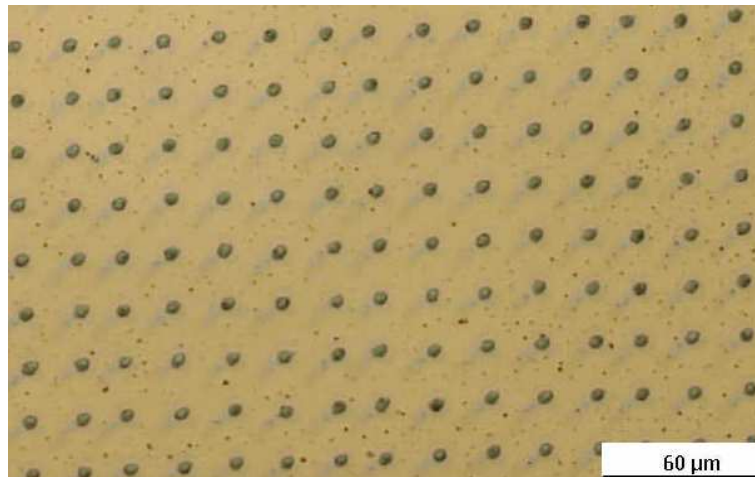


Figura 3.2: Sustrato recubierto con TiN con textura superficial inducida por láser.

3.2.2 Función de la textura superficial

Un determinado estado superficial no controlado puede ser la causa de fallos prematuros en un sistema. No obstante, cuando este estado superficial consta de una cierta textura deseada, buscada o inducida, dicha textura puede traducirse en una mejora en las propiedades al contacto del material bajo solicitaciones reales.

Las funciones de mayor interés, desde el punto de vista tribológico, que se persiguen con la introducción de una textura en la superficie de una herramienta son que ésta actúe como reserva de lubricante y/o “almacén” de partículas de desgaste.

Bajo condiciones de lubricación, la textura superficial puede suponer una reserva de lubricante entre las dos partes en contacto, aportándolo paulatinamente con el tiempo y permitiendo mejorar las condiciones de lubricación del sistema.

Por otro lado, dicha textura puede servir de almacén para las partículas generadas por desgaste de las dos piezas en contacto. De este modo, una textura adaptada al tamaño de estas partículas permite apartarlas de la zona de trabajo, eliminando así la presencia de un tercer cuerpo y, por tanto, la existencia de desgaste por abrasión y mejorando el comportamiento tribológico del par. En la Figura 3.3, se puede apreciar esta función y se observa que las partículas de desgaste provenientes de la bola de ensayo se acumulan en las cavidades inducidas.



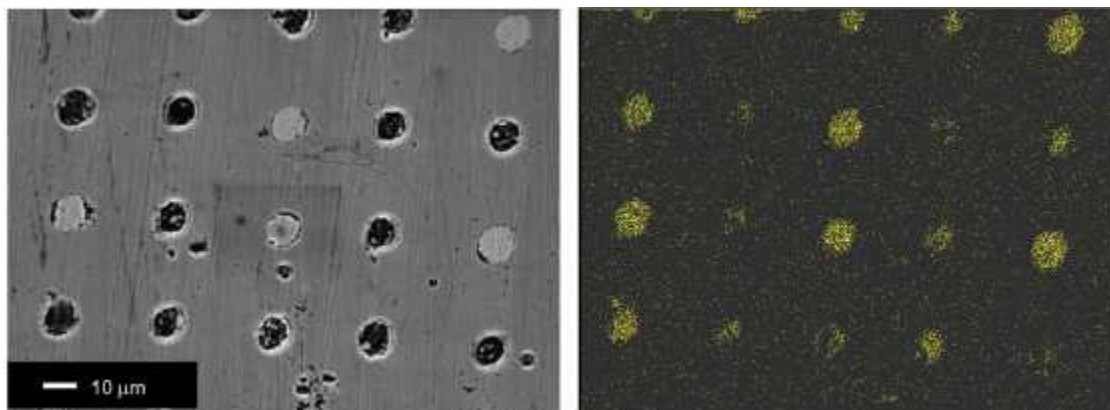


Figura 3.3: Imágenes de MEB de un sustrato con textura superficial después de un ensayo tribológico. [1], [2]

En consecuencia, se obtiene que, bajo condiciones de fricción, los sistemas que poseen una textura superficial presentan un coeficiente de fricción más bajo y más estable con el tiempo, en contraposición a los conjuntos sin textura donde este parámetro puede exhibir un aumento rápido, alcanzando valores extremadamente elevados que pueden originar el fallo del sistema (Figura 3.4).

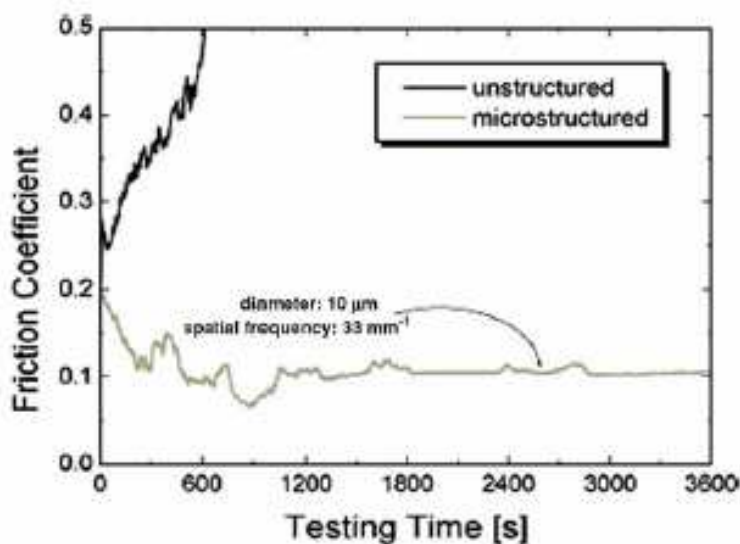


Figura 3.4: Evolución del coeficiente de fricción de un material con y sin textura superficial. [2]



3.2.3 Textura superficial por láser

Hoy en día, existen diversas técnicas (ataque químico, ataque por plasma, fotolitografía, *micro-blasting*...) para introducir una determinada textura superficial en un material en función de la naturaleza de éste, siendo la introducción de textura superficial por láser uno de los procesos que en los últimos años está despertando un gran interés. Además, para el caso de sistemas constituidos por un sustrato recubierto, este tipo de técnica permite trabajar siguiendo una de las siguientes vías:

3.2.3.1 Vía directa

El procedimiento directo consiste en inducir textura superficial directamente sobre el sustrato recubierto de modo que pueden obtenerse cavidades con una profundidad menor, igual o mayor que el espesor del recubrimiento (Figura 3.5). En esta aproximación, es necesario escoger los parámetros de trabajo adecuados para minimizar el tamaño de las zonas colaterales afectadas.

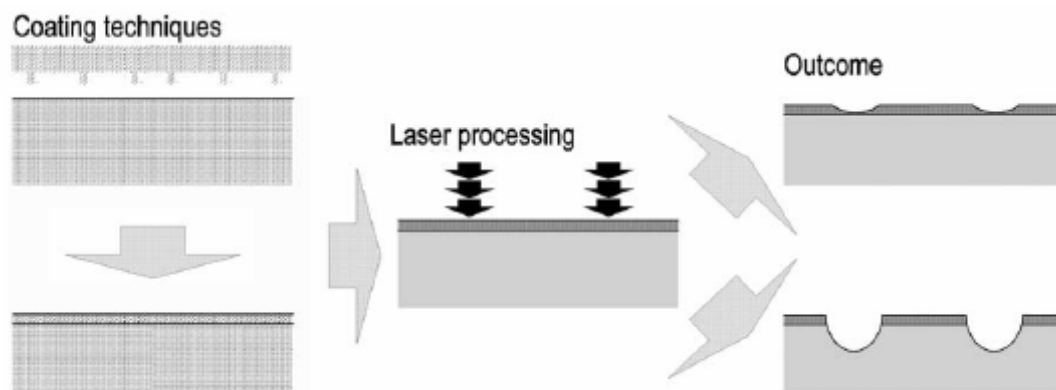


Figura 3.5: Introducción de textura superficial mediante láser por vía directa. [2]

3.2.3.2 Vía indirecta

Mediante esta vía, primero se induce textura superficial en el sustrato para, posteriormente, recubrirlo. De esta manera, se consigue una película que sigue la estructura subyacente pero que modifica levemente el tamaño de las microcavidades (Figura 3.6). En este caso,



se requiere de unos parámetros de trabajo que optimicen la eficiencia de ablación del sustrato.

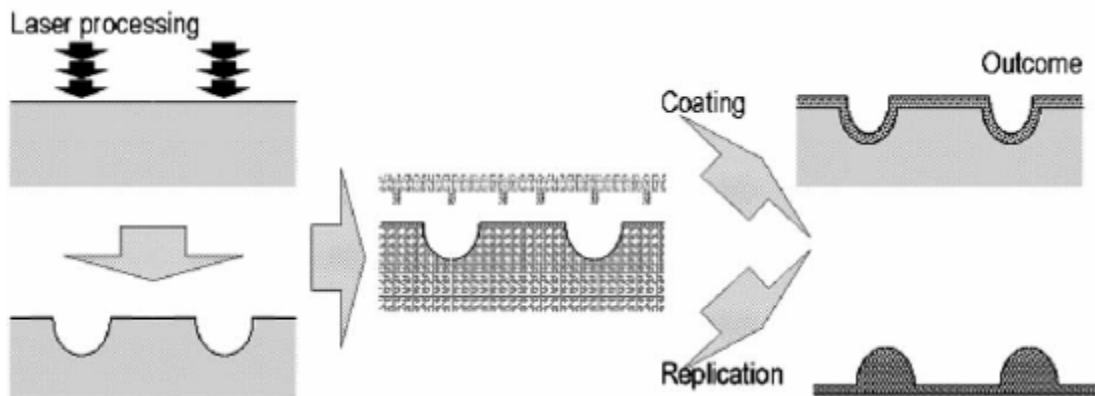


Figura 3.6: Introducción de textura superficial mediante láser por vía indirecta. [2]

Independientemente de la vía utilizada, la ablación o eliminación de material por láser para obtener la textura deseada tiene lugar por evaporación y, en el caso de densidades de energía elevadas, por expulsión directa de material fundido. Además, si la duración del pulso láser es relativamente elevada, por ejemplo nanosegundos, existe también difusión de la energía aportada por el haz láser a través del material originando un aumento de temperatura local alrededor de la cavidad y, consecuentemente, un cambio en la microestructura y propiedades mecánicas de esta zona (zona afectada térmicamente, ZAT). Por otro lado, en el caso de microcavidades que presentan una elevada profundidad, el material evaporado o fundido puede no llegar a tener la suficiente energía cinética para salir de la cavidad de modo que se redeposita en las paredes del cráter dando lugar a una cavidad más fina y/o más estrecha cerca de la superficie que dentro del material.

3.2.4 *Parámetros del láser*

En función del material, existen diversos parámetros del láser que deben tenerse en cuenta para lograr la profundidad y geometría de la textura superficial deseadas. Éstos son:

- Longitud de onda de la fuente láser: IR, UV, etc. Para un material dado, se debe buscar aquella longitud de onda donde el porcentaje de pérdida de radiación por reflexión sea mínima.



- Densidad de energía o fluencia: la densidad de energía aportada al material debe ser superior a un umbral por encima del cual tienen lugar los fenómenos de ablación. No obstante, ésta no debe ser extraordinariamente elevada ya que entonces, los procesos de ablación se tornan irreproducibles.
- Duración de pulso: femtosegundos, picosegundos, nanosegundos, etc. En general, cuanto mayor es dicha duración, mayor es el espesor de la ZAT.
- Número de pulsos por punto: la repetición de varios pulsos de baja energía en lugar de un único pulso de energía elevada, puede llevar a cavidades más profundas sin modificar el diámetro de éstas.
- Frecuencia de pulsos y velocidad de barrido de las lentes posicionales: la combinación de ambos parámetros determina el patrón de textura superficial.

En resumen, buscando la combinación óptima de los parámetros del láser para un determinado material, se puede obtener la textura superficial deseada que permita mejorar el comportamiento tribológico del sistema bajo condiciones de servicio.

3.3 Comportamiento de recubrimientos duros bajo sollicitaciones de impacto

Los recubrimientos duros resistentes al desgaste protegen herramientas de trabajo sometidas a condiciones severas de fallos provocados por corrosión y desgaste. En general, mejoran la vida en servicio de la herramienta.

La morfología de estas capas depende de los siguientes factores de deposición: presión del gas, polarización y relación de temperaturas del recubrimiento-sustrato. Es muy importante controlar la temperatura de deposición para optimizar las propiedades del recubrimiento y no afectar a las del sustrato. Temperaturas bajas dan como resultado un crecimiento columnar del recubrimiento, lo que le proporciona mayor elasticidad. Por otro lado, estas estructuras columnares son más apropiadas para aplicaciones bajo cargas/tensiones dinámicas compresivas.

Para recubrimientos finos, la mayor parte del impacto se transmite desde el recubrimiento al sustrato, donde crece la mayor parte de la tensión de cizalladura. Por otro lado, su bajo espesor es la razón de su baja contribución a la rigidez del sistema.



La causa principal de la degradación de los recubrimientos es el bajo límite elástico del sustrato que permite una deformación plástica bajo el indentador, hecho que el recubrimiento, normalmente frágil, no puede seguir. En los ensayos de impacto el recubrimiento bajo el indentador es deformado plásticamente, por lo que se empiezan a producir microgrietas para reducir su estado tensional. El desgaste en las microgrietas aumenta con el número de impactos, hasta que se produce la delaminación o las grietas anillo.

La adherencia del recubrimiento es un factor determinante en el comportamiento del mismo. Desde este punto de vista, capas intermedias adecuadas entre el recubrimiento exterior y el sustrato sirven para reducir las discontinuidades de tensiones entre ambos, además de mejorar la adhesión con la capa externa. Otra estrategia a seguir es la de nitrurar sustratos, particularmente aceros, que van a ser recubiertos con TiN o TiCN. Para comprobar la adherencia de los recubrimientos depositados se suele recurrir a ensayos como el de rayado. Se puede tomar la siguiente relación como referencia: mayores cargas críticas en ensayos de rayado significan mejores resultados del sistema a fatiga.

3.3.1 *Fatiga por contacto en sistemas sustrato–recubrimiento*

La caracterización mecánica de materiales mediante el método de indentación por contacto Hertziano presenta muchas ventajas. La simplicidad experimental y el pequeño volumen de muestra requerido para un ensayo son partes comunes a todos los métodos de caracterización por contacto o indentación. Algunas veces, la indentación es la única manera práctica de obtener información sobre los modos de daño y sus mecanismos en muchos materiales, especialmente en los cerámicos y en materiales recubiertos.

No obstante, la literatura existente acerca de fatiga por contacto sobre sistemas sustrato-recubrimiento no es muy abundante. Se limita a contados estudios centrados sobre recubrimientos base Ti (TiN, TiCN, Ti-DLC...) depositados sobre aceros de herramientas.

La investigación llevada a cabo por R. *Bantle* y A. *Matthews* en 1995 [8] proponía un modelo que definía los diferentes modos de daño observados en el recubrimiento (que serán expuestos posteriormente). Asimismo, explicaba la causa del fallo del recubrimiento y demostraba el incremento del daño por fractura/casi-plástico y del desgaste al aumentar la carga aplicada y/o el número de ciclos.

Posteriormente *E. Lugscheider et al* [9] relacionaron la evolución del daño con la adherencia



del recubrimiento al sustrato y con la microestructura de la película depositada. Sin embargo, en este estudio se definía el daño exclusivamente como la delaminación del recubrimiento.

K.D. Bouzakis et al [10] introdujeron el uso del modelado por elementos finitos en el estudio de la fatiga por contacto, lo que permitía la determinación de los campos tensionales presentes en los sistemas y de las curvas S-N de manera directa.

Más recientemente *M. Stoiber et al* [11] utilizando también como recurso el modelado por elementos finitos analizaron la criticidad de los campos tensionales en el daño observado en las probetas. Asimismo, caracterizaron el papel de la adhesión en la fatiga por contacto. En este contexto, incidieron en la importancia de los parámetros de deposición estableciendo estrategias para la optimización de la adhesión de los recubrimientos.

En la presente investigación se utilizará un sustrato de metal duro, 10F, recubierto con TiN o WC/C con textura superficial inducida por láser. Se identificarán los modos de daño y se estudiará su evolución con cargas y/o número de ciclos creciente para ambos sistemas.

Se ampliará el estudio estableciendo las cargas críticas de daño bajo contacto monotónico y cíclico. Estos valores nos permitirán determinar un parámetro como la sensibilidad a fatiga, clave en la explicación del comportamiento de cada uno de los sistemas estudiados.

3.3.2 Modos de daño en recubrimientos cerámicos

Se pueden distinguir tres zonas de daño en un recubrimiento de escala micrométrica:

- Una zona central que presenta daño de tipo cohesivo, el cual supondrá mayor daño por fatiga. Tras un cierto número de impactos, fallos cohesivos se suelen apreciar en todos los recubrimientos.
- Una zona intermedia correspondiente a la cara interior del borde formado alrededor de las huellas de indentación que presenta fallo de tipo cohesivo-adhesivo. Este tipo de fallo se produce en el recubrimiento debido a la acumulación de tensiones de cizalladura que crecen en el sustrato bajo la bola en el proceso de indentación.
- Una zona periférica con grietas anillo. Estas grietas anillo pueden propagarse en el sustrato formando grietas cono.



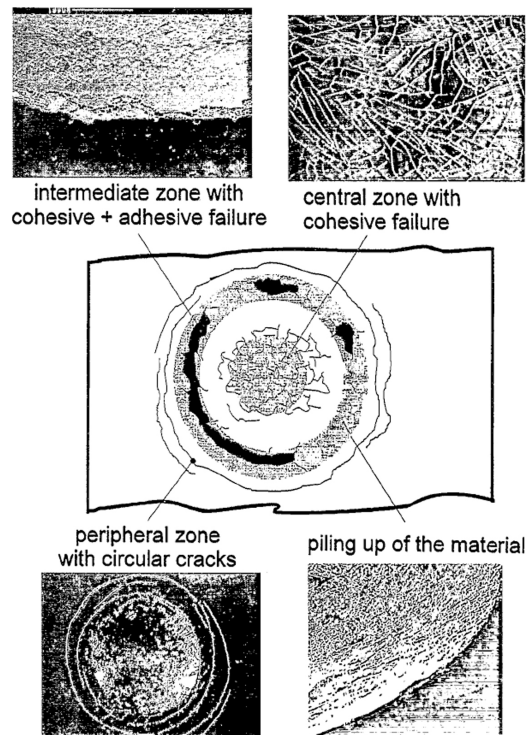


Figura 3.7: Degradación bajo indentación por contacto mostrando diferentes modos de fallo. [3]

Para un mayor número de ciclos el número de grietas en el recubrimiento crece así como el también desgaste en cada una de ellas, antes que todo el conjunto comience a delaminarse.

En recubrimientos gruesos, con espesores muy por encima de $1\mu\text{m}$, bajo la acción de indentadores de escala milimétrica, se observan daño por grieta anillo-cono o casi-plástico en la cara superior y grietas radiales en la cara inferior. En el sustrato el daño es casi-plástico. Las grietas radiales se inician a cargas relativamente bajas y son muy difíciles de detectar. En cambio, para recubrimientos muy finos, con espesores muy por debajo de $1\mu\text{m}$, el fallo se debe a grietas transversales bajo la acción del indentador.



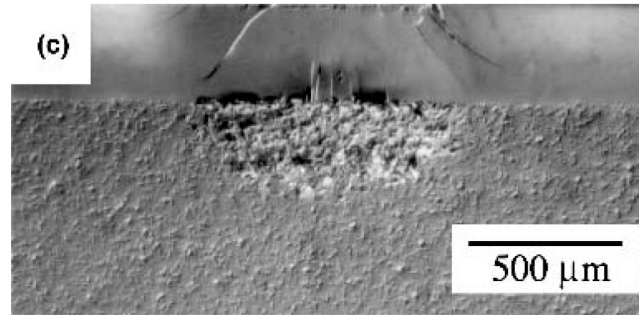


Figura 3.8: Sistema Vidrio/C-MGC, $r = 3,18$ mm y $P = 350$ N. Se observa daño por grieta como en la cara superior del recubrimiento y grieta radial en la cara inferior. En el sustrato se aprecia daño casi-plástico.

Se puede establecer dos criterios de fallo:

- El fallo del recubrimiento se designa como la iniciación de una grieta en el mismo que anuncia una próxima consecuente pérdida de las propiedades mecánicas del sistema.
- El fallo del recubrimiento se designa como la repentina o gradual pérdida del mismo o delaminación, con la consecuente exposición del sustrato.

Para ambos casos se puede definir el *límite monotónico* como aquella tensión para la cual no se observa fallo, bajo solicitaciones monotónicas de aplicación de carga y el *límite a fatiga* como aquella tensión para la que, tras 10^6 ciclos, el recubrimiento no falla.

No obstante, en la mayoría de los estudios previamente citados donde se investiga el comportamiento a fatiga por contacto de sistemas sustrato – recubrimiento, los resultados se presentan en términos de carga en lugar de tensión, hecho que no permite una comparación directa entre sistemas estudiados bajo distintas condiciones experimentales (diferente radio de curvatura del indentador).

3.3.3 Contacto Hertziano: tensión y deformación de indentación esférica

Los ensayos Hertzianos permiten obtener la respuesta tensión-deformación de indentación esférica de sistemas recubiertos. A partir del radio de curvatura de la esfera, r , la carga de indentación, P , y la medida del radio residual, a , se puede evaluar la tensión de indentación,



p_0 , y la deformación de indentación, a/r . [4]

$$p_0 = P/\pi a^2 \quad (1)$$

En el caso de régimen elástico, dicha tensión de indentación se puede expresar como

$$p_0 = (4E^*/3\pi)(a/r) \quad (2)$$

donde E^* es el módulo equivalente

$$1/E^* = (1-\nu^2)/E^2 + (1-\nu_i^2)/E_i^2 \quad (3)$$

siendo E y ν el módulo elástico y coeficiente de Poisson respectivamente del material indentado y. E_i y ν_i los correspondientes al indentador.



3.4 Tribología

La tribología es la ciencia que estudia el rozamiento, la fricción y el consecuente desgaste entre dos cuerpos que presentan movimiento relativo. Como ejemplo de partes sometidas a estas condiciones, se encuentran componentes de motores, herramientas de corte y de conformación, etc.

Para estos casos, existe una fricción continuada o periódica que juega un papel relevante en la determinación del tiempo de vida útil de estas piezas. Con la finalidad de reducir esta fricción y/o desgaste derivado de ella y alargar así dicho tiempo de vida, es necesario desarrollar e investigar nuevos sistemas que sean capaces de soportar estas condiciones.

Estos nuevos sistemas pueden provenir de la aplicación de nuevos lubricantes, recubrimientos, parejas sustrato-recubrimiento y/o de la introducción de textura superficial en el sistema y pueden ser estudiados mediante ensayos de tribología.

Los ensayos tribológicos permiten simular las situaciones reales que encuentran estos nuevos sistemas durante servicio. Si bien es cierto que permiten trabajar con gran cantidad de parámetros y configuraciones (condiciones de lubricación o en seco, movimiento circular o lineal, carga, velocidad angular, velocidad lineal, diámetro y material de la contraparte, temperatura, humedad, etc.), los resultados obtenidos bajo unas ciertas condiciones experimentales sólo son válidos bajo las mismas, no permitiendo extrapolar el comportamiento del sistema para otros casos.

Varios estudios ya han sido realizados en sustratos de acero y metal duro y sistemas recubiertos con TiN con textura superficial. No obstante, conjuntos con WC-C y textura superficial han sido poco investigados, siendo en consecuencia uno de los objetivos del presente trabajo.

En estos trabajos, se ha estudiado la evolución del coeficiente de fricción del sistema con la distancia de deslizamiento recorrida. Los resultados muestran claramente que los materiales con textura superficial exhiben una mejor respuesta en comparación con los materiales sin dicha textura:

El final del ensayo o fallo del material es definido como la longitud de deslizamiento recorrida antes que el coeficiente de fricción llegue a un determinado valor. Para estudios con el sustrato (acero), se observa que el tiempo de vida útil del sustrato con textura superficial es aproximadamente diez veces mayor que el correspondiente al sustrato sin textura. [6] En sistemas recubiertos con TiN y con textura superficial, también se observa un aumento del 25% en la longitud de deslizamiento recorrida en comparación con el sistema sin textura. Además, el coeficiente de fricción del sistema con textura se mantiene



más estable en el tiempo que el del sistema sin textura.

Finalmente, en estas investigaciones se muestra que la textura superficial todavía aparece una vez ya ha terminado el ensayo y que las cavidades contienen las partículas originadas por desgaste, retrasando de esta manera el fallo del sistema. [7]



4 Procedimiento experimental

4.1 Material empleado

Se investigaron dos sistemas constituidos por un sustrato comercial de metal duro, 10F, subministrado por DURIT-Ibérica S.L., recubierto mediante PVD por Oerlikon Balzers-Elay S.A. con BALINIT® A (TiN) y BALINIT® C (WC/C).

Antes de la deposición industrial, el material base fue desbastado y pulido en su superficie a recubrir tal y como se indica en la tabla 4.1.

	Medio	Discos	Tiempo (min)
Desbaste	Agua	Adiamantado de 68 μm	10
Pulido	Suspensión de diamante de 30 μm + lubricante	Paño	20
	Suspensión de diamante de 6 μm + lubricante	Paño	20
	Suspensión de diamante de 3 μm + lubricante	Paño	20

Tabla 4.1: Esquema de la preparación superficial de los sustratos.

En la Tabla 4.2, se presentan las propiedades del metal duro, 10F, empleado como sustrato:



V_{Co} (% peso)	10,0
d_{WC} (μm)	0,50
HV20 (GPa)	14,5
K_{Ic} (MPa√m)	9,2
E (GPa)	541
σ_r (MPa)	2742

Tabla 4.2 : Porcentaje en peso de cobalto, tamaño medio de grano de la fase carburo, dureza Vickers, tenacidad a fractura, módulo de elasticidad y resistencia a flexión (cuatro puntos) del metal duro empleado.

En cuanto a los recubrimientos cerámicos de TiN y WC/C, éstos exhiben las propiedades mostradas en la Tabla 4.3. Además, inspecciones mediante MEB de superficies de fractura transversales revelan que ambos recubrimientos poseen estructura columnar (Figura 4.4 y Figura 4.5)

Recubrimiento	Espesor (μm)	Dureza (GPa)
TiN	3,7 ± 0,1	29,5
WC/C	3,3 ± 0,1	10,6

Tabla 4.3 : Propiedades de los recubrimientos cerámicos empleados en el presente trabajo.



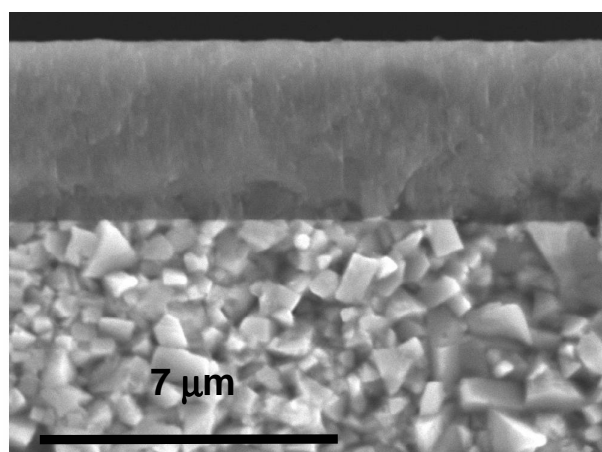


Figura 4.4 : Imagen MEB del sistema 10F + TiN

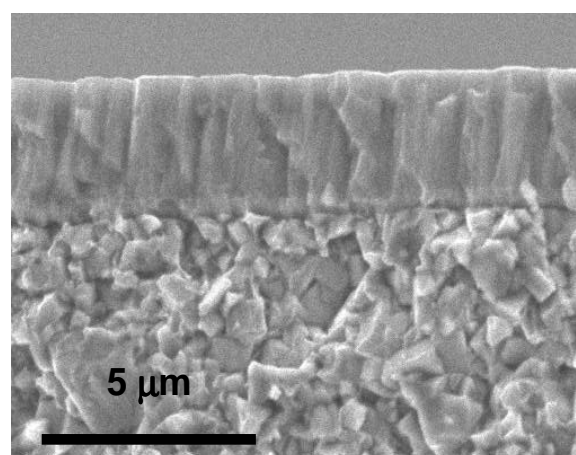


Figura 4.5: Imagen MEB del conjunto 10F + WC/C

Estos sistemas también presentan una textura superficial inducida por láser. Dicha textura consta de una distribución cuadrada de microcavidades en la superficie del recubrimiento (Tabla 4.6).

Recubrimiento	Geometría a x b (μm^2)	Profundidad cavidad (nm)	Energía de pulso (μJ)
TiN	20 x 20	~ 600	6
WC/C	20 x 20	~ 800	6

Tabla 4.6 : Propiedades de la textura superficial inducida por láser.



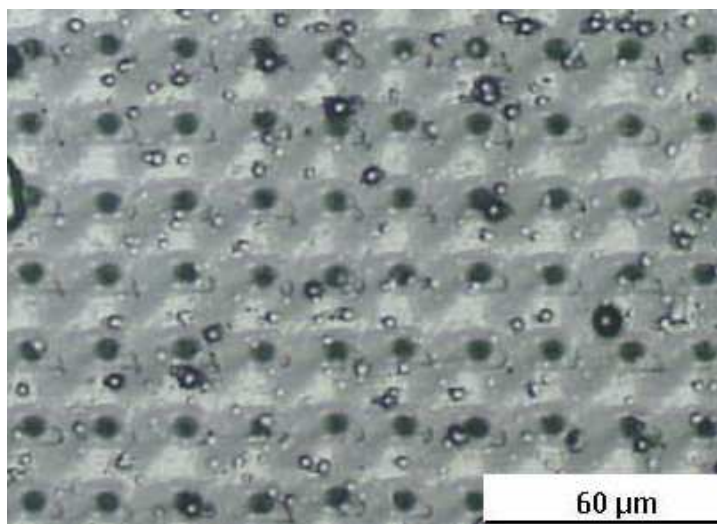


Figura 4.7: Microscopio óptico. Textura superficial del sistema 10F + WC/C + Láser

4.2 Indentación esférica monotónica

Los ensayos de indentación se realizaron utilizando una máquina servohidráulica INSTRON Modelo 8511. Se aplicaron cargas de 100 a 3000 N.



Figura 4.8 : Máquina de ensayos universal Instron 8511 empleada para los ensayos de contacto esférico.

Los ensayos monotónicos se llevaron a cabo según el esquema siguiente, donde se indican las fases de carga, mantenimiento de carga y de descarga. Se efectúa una primera precarga de 50 N para garantizar el contacto antes de realizar el ensayo.



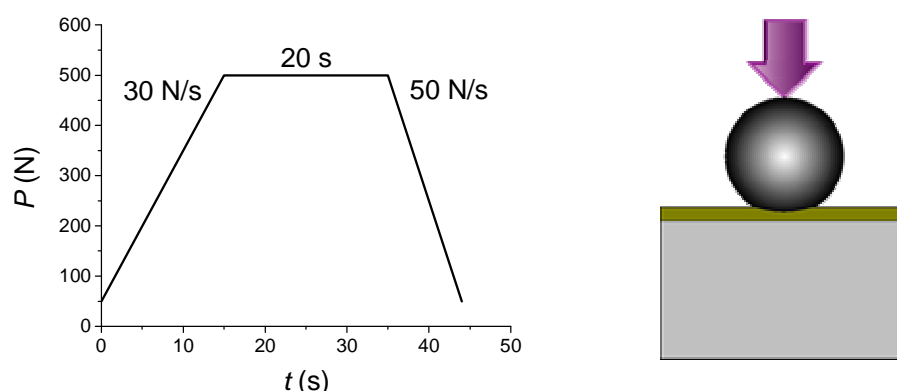


Figura 4.9: Esquema del procedimiento de indentación esférica monotónica

Con la finalidad de obtener las curvas tensión–deformación de indentación, los ensayos monotónicos fueron realizados con indentadores esféricos de metal duro de 2,5 mm y 5 mm de diámetro sobre probetas recubiertas con una finísima capa de oro. La ductilidad del oro permite recoger la deformación elástica y plástica del sistema en las huellas y la medición de las mismas resulta mucho más fácil, con márgenes de error muy pequeños.

Por otro lado, para establecer mediante microscopía óptica la carga crítica para la aparición de daño (grietas circulares) en la superficie de cada sistema, se realizaron ensayos monotónicos sobre conjuntos sin capa de oro.

En la presente investigación, se evaluará la respuesta bajo solicitaciones monotónicas de indentación esférica de los siguientes sistemas:

- 10F + TiN
- 10F + TiN + Textura superficial
- 10F + WC/C + Textura superficial

4.3 Indentación esférica cíclica

Los ensayos de fatiga se realizaron en probetas sin recubrimiento de oro empleando una esfera de metal duro de 2,5 mm de diámetro en la máquina servohidráulica antes citada. Para cada sistema se aplicaron cargas inferiores a la carga crítica previamente



determinada para cada sistema en los ensayos de indentación esférica monotónica. El número de ciclos varió entre 10^3 y 10^6 , la frecuencia fue 10 Hz, excepto en el caso de 10^6 ciclos donde fue 12 Hz, y el coeficiente de carga, R , definido como P_{\min}/P_{\max} , fue 0,1; excepto para ensayos con $P_{\max} \leq 100$ N, donde fue 0,2.

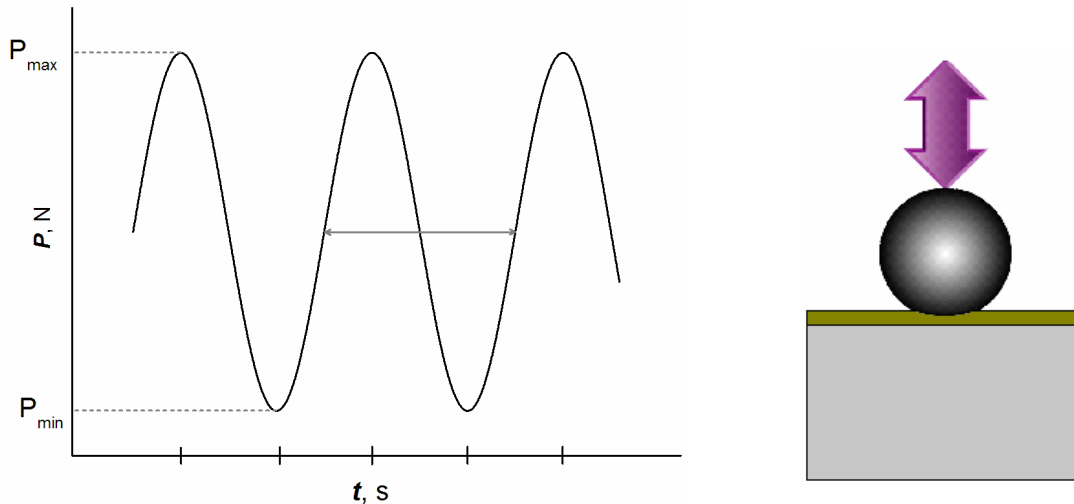


Figura 4.10 : Fatiga por contacto esférico.

4.4 Ensayos de tribología

Se dispone de probetas circulares de 25 mm de diámetro y 5 mm de espesor para el sustrato 10F y los sistemas 10F + TiN, 10F + TiN + Textura superficial, 10F + WC/C y 10F + WC/C + Textura superficial.

Los ensayos *Pin – on- Disk* se llevaron a cabo en un tribómetro TRM 1000 WAZAU GMBH (Figura 4.6) en seco y empleando *pins* de metal duro, 06F (HV20 17,6 GPa), con radio de curvatura de $2,0 \pm 0,2$ mm. Las cargas empleadas oscilaron entre 5 y 80 N y las velocidades lineales escogidas fueron 0,01 m/s y 0,1 m/s con la finalidad de encontrar las condiciones experimentales óptimas.

Los datos registrados fueron carga, fuerza de fricción, coeficiente de fricción y profundidad de desgaste. Asimismo, con el propósito de investigar el volumen desgastado o velocidad de desgaste, las probetas fueron pesadas antes y después de cada ensayo tribológico.



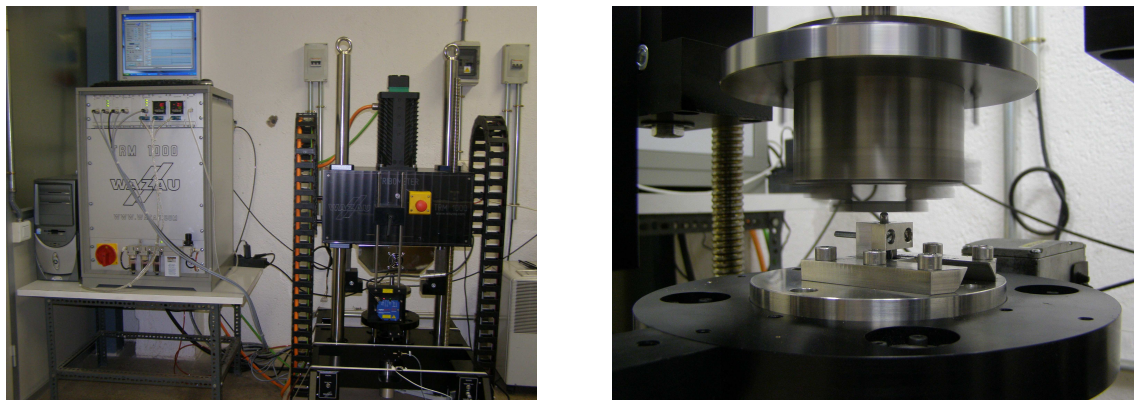


Figura 4.11 : Tribómetro TRM 1000 y detalle del mismo.



5 Resultados y discusion

5.1 Indentación esférica monotónica

5.1.1 Curvas P_0 vs a/r

Se indentaron los materiales estudiados con esferas de metal duro de 2,5 y 5 mm de diámetro. Mediante análisis en microscopía óptica y usando un diafragma, se midió el tamaño de las huellas residuales, las cuales permitieron obtener las curvas tensión-deformación de indentación para cada sistema. Las tensiones y deformaciones de indentación fueron calculadas según las ecuaciones presentadas en el capítulo 3.3.3.

Los indentadores de 2,5 mm de diámetro se utilizaron, cuando un diámetro de 5 mm requería de cargas demasiado elevadas para generar tensiones suficiente elevadas.

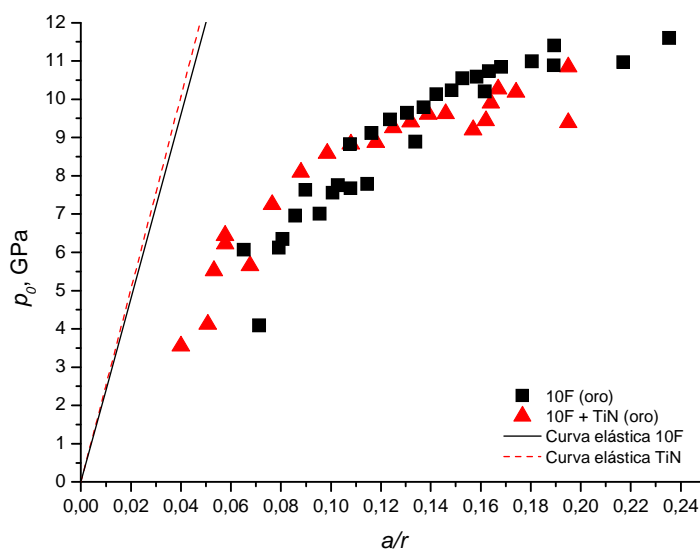


Figura 5.1: Curvas P_0 vs a/r del sistema 10F + TiN y del sustrato 10F



Se pueden observar los valores de tensión y deformación correspondientes a las huellas producidas por los indentadores de diferente diámetro sobre el sistema 10F + TiN, con una capa de oro. El comportamiento de este sistema se compara al sistema constuido por el sustrato desnudo. Se aprecia una dispersión de los resultados bastante baja.

El sistema 10F + TiN muestra un comportamiento muy similar al del sustrato, en todo el rango de tensiones estudiado.

A continuación se muestran las curvas tensión-deformación del sistema 10F + TiN + láser, en comparación a las curvas tensión-deformación del sustrato desnudo.

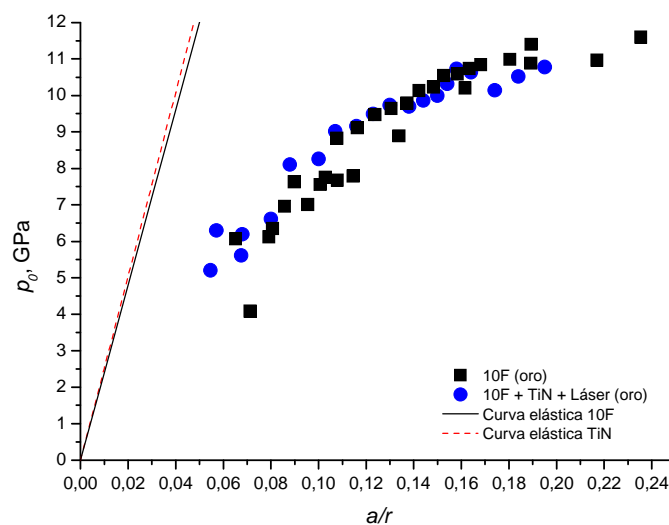


Figura 5.2:Curvas P_0 vs a/r del sistema 10F + TiN + textura superficial y del sustrato 10F

Todavía se nota una baja dispersión de los resultados, y una respuesta del sistema bastante similar a la del sustrato, tanto para cargas bajas como elevadas.



En la figura 5.3 se muestra el comportamiento del sistema 10F + WC/C + láser. Los valores obtenidos son bastante homogéneos, pero este sistema muestra una respuesta en términos de tensiones un poco más baja que los otros sistemas.

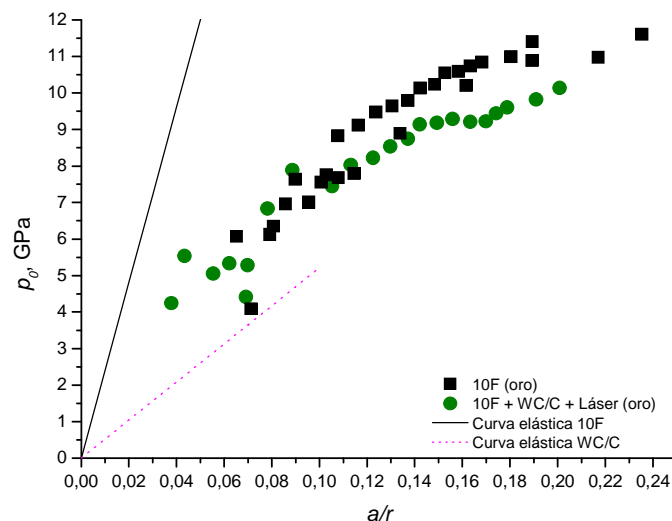


Figura 5.3: Curvas P_0 vs a/r del sistema 10F+WC/C y del sustrato 10F



5.1.1.1 Comparación de los sistemas

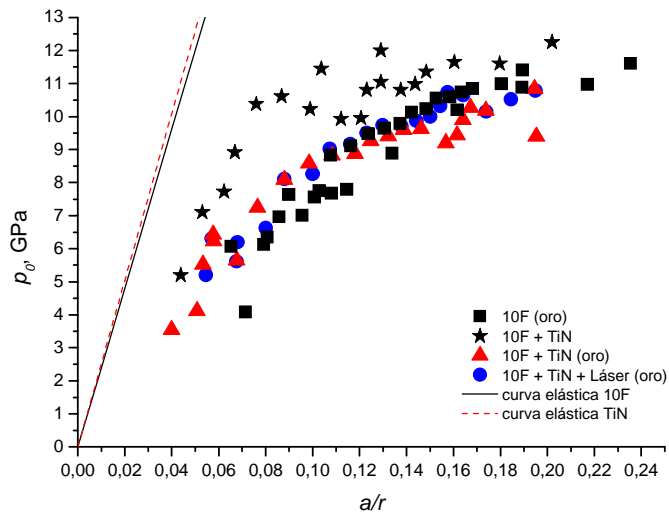


Figura 5.4: Curvas P_0 vs a/r del sistema 10F+TiN y del sustrato 10F

La gráfica 5.4 muestra el comportamiento bajo solicitaciones monotónicas para cada sistema recubierto con TiN, texturado o no, recubierto con oro o no, así como el comportamiento del sustrato solo.

Primero, se ve claramente la diferencia entre los valores del sistema 10F y los valores del mismo, pero recubierto con oro. Los ensayos realizados sin capa de oro sobre el sustrato muestran tensiones más elevadas, y una dispersión más importante.

Por otro lado, los sistemas recubiertos con una capa de oro muestran un comportamiento similar, que sea el sustrato, el sistema 10F + TiN o 10F + TiN + láser. La texturación por láser de este sistema no parece cambiar su comportamiento mecánico bajo indentación monotónica.



En la figura 5.5, se trata de comparar los sistemas recubiertos con WC/C.

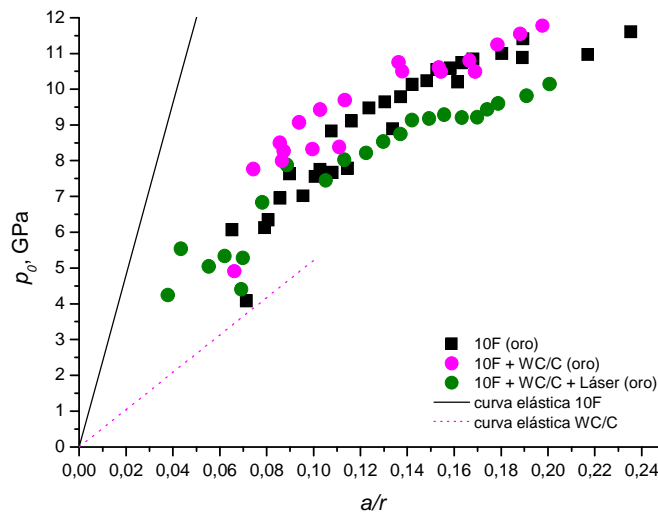


Figura 5.5: Curvas P_0 vs a/r de los sistemas 10F + WC/C texturado o no.

El sistema 10F + WC/C + láser muestra valores de tensiones más bajas, y sobretodo para cargas (y entonces tensiones) bastante elevadas. El sistema 10F + WC/C es superior al comportamiento del sustrato desnudo, mientras que el sistema texturado es inferior, en términos de respuesta mecánica bajo estas sollicitaciones. Ésto puede ser debido a los defectos en la superficie del sistema inducidos por la texturación.



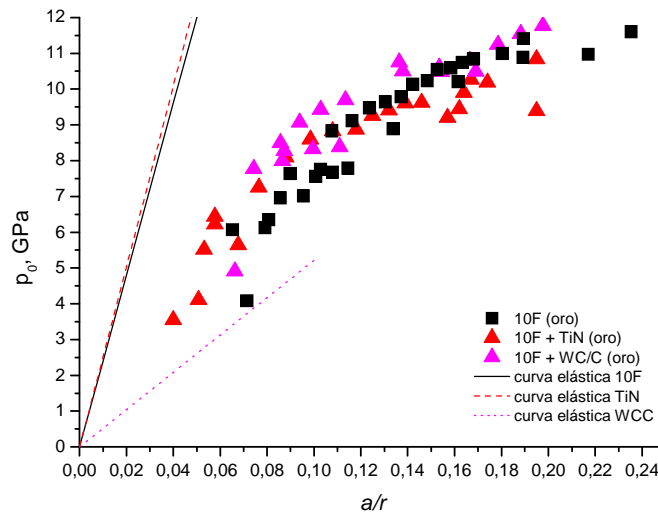


Figura 5.6: Comparación de las curvas P_0 vs a/r de los dos sistemas sin textura

En la figura 5.6 se presenta el comportamiento relativo de los dos sistemas recubiertos, sin texturación superficial. La respuesta de cada sistema es bastante similar, pero parece que para cargas bastante elevadas, y entonces tensiones también altas, el sistema recubierto con WC/C es levemente superior al sistema recubierto con TiN.

Ya que estos valores dependen directamente de las medidas, estas mínimas diferencias se pueden deber a los errores de medición de las huellas.

Cuando texturados, estos sistemas recubiertos muestran un comportamiento mecánico un poco más bajo en términos de tensiones. La texturación superficial parece afectar más el sistema recubierto con WC/C, que muestra valores inferiores al sistema 10F + TiN + láser.



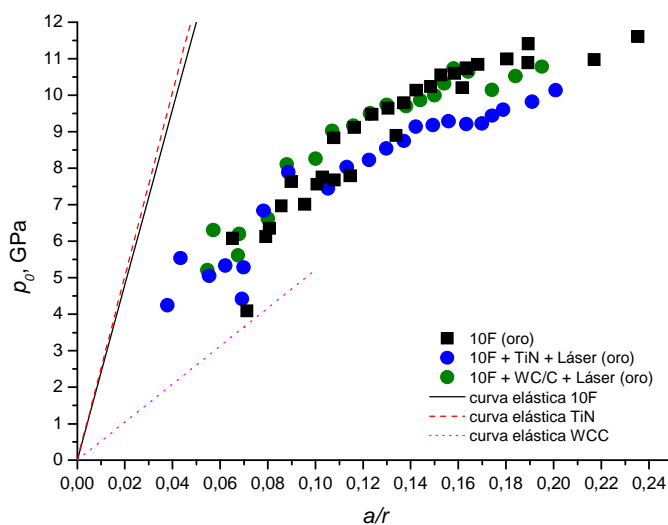


Figura 5.7: Comparación de las curvas P_0 vs a/r de los dos sistemas con textura superficial

Como primera conclusión, se puede decir que el comportamiento general de estos sistemas bajo solicitaciones de indentación esférica es principalmente debido a las propiedades del sustrato, y que los recubrimientos no implican cambios significativos en la respuesta de estos sistemas frente a estas solicitaciones.



5.1.2 Determinación del límite elástico

Para cada uno de los sistemas se ha establecido su límite elástico. Para determinar el límite elástico, σ_y , en la curva P_0 vs a/r de cada sistema, se buscó la intersección de la curva elástica con el ajuste potencial de los datos experimentales.

Sistemas recubiertos sin textura:

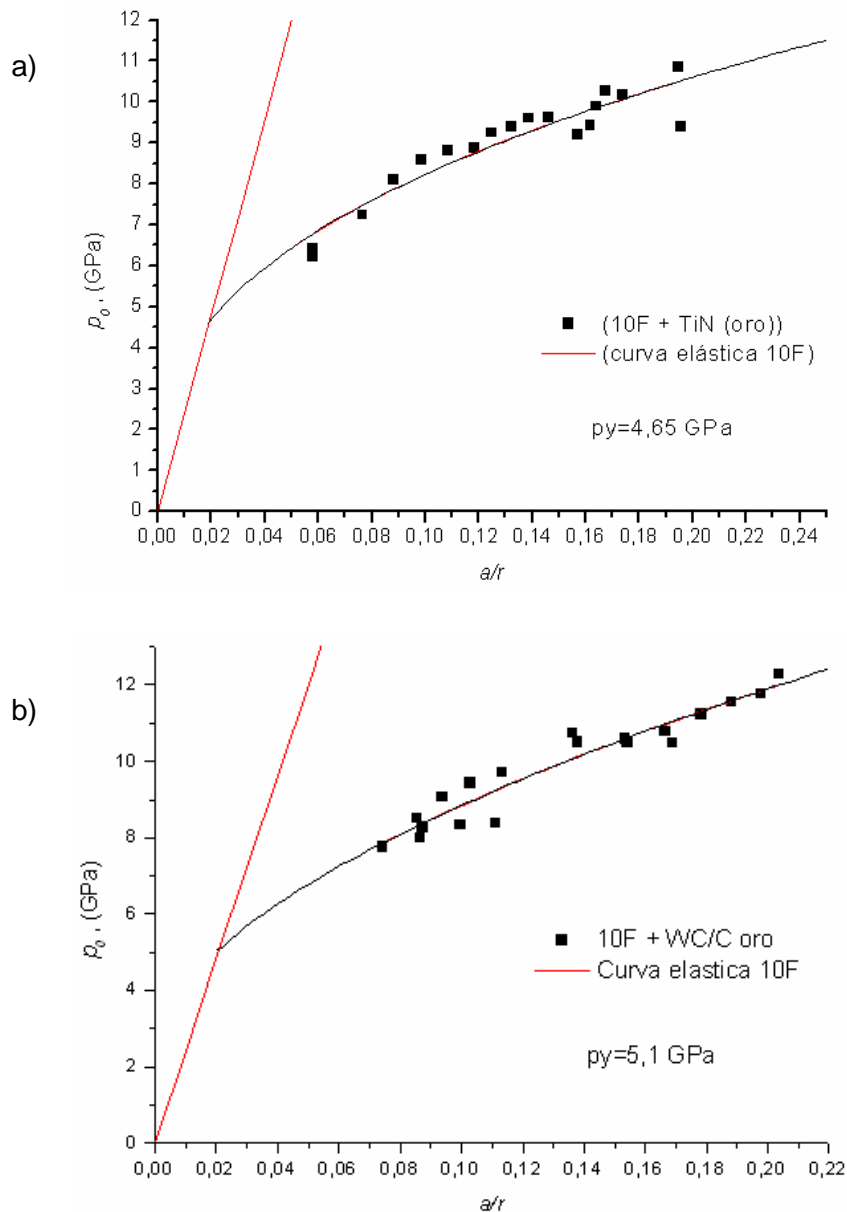


Figura 5.8: σ_y para a) 10F+TiN b) 10F+WC/C



Se calcularon también los límites elásticos de los sistemas, pero a continuación con textura superficial.

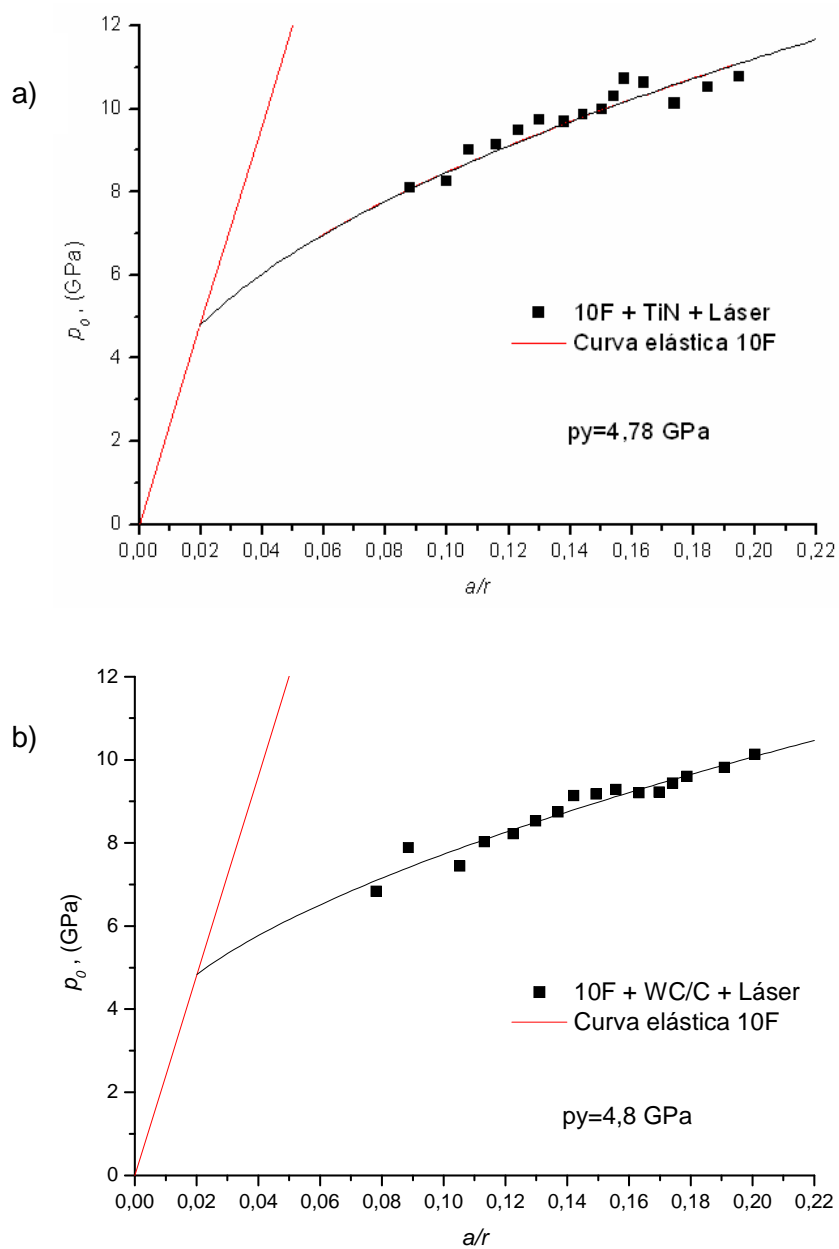


Figura 5.9: σ_y para a) 10F+TiN+láser b) 10F+WC/C+láser



Sistema	σ_y (GPa)
10F + TiN	4.7
10F + TiN + Láser	4.8
10F + WC/C	5.1
10F + WC/C + Laser	4.8

Tabla 5.10: Límite elástico estimado para los dos sistemas investigados.



5.1.3 Identificación del daño por contacto esférico

Los materiales estudiados se deforman casi-plásticamente al aplicar cargas por contacto esférico, formándose huellas debido a la deformación plástica residual. Tanto el diámetro como la profundidad de las huellas aumentan con la carga aplicada. El daño se caracteriza, para cargas superiores a una carga crítica, por la formación de grietas anillo.

Definimos *carga crítica* a aquella que provoca daño en el sistema, entendido como la aparición de grietas anillo.

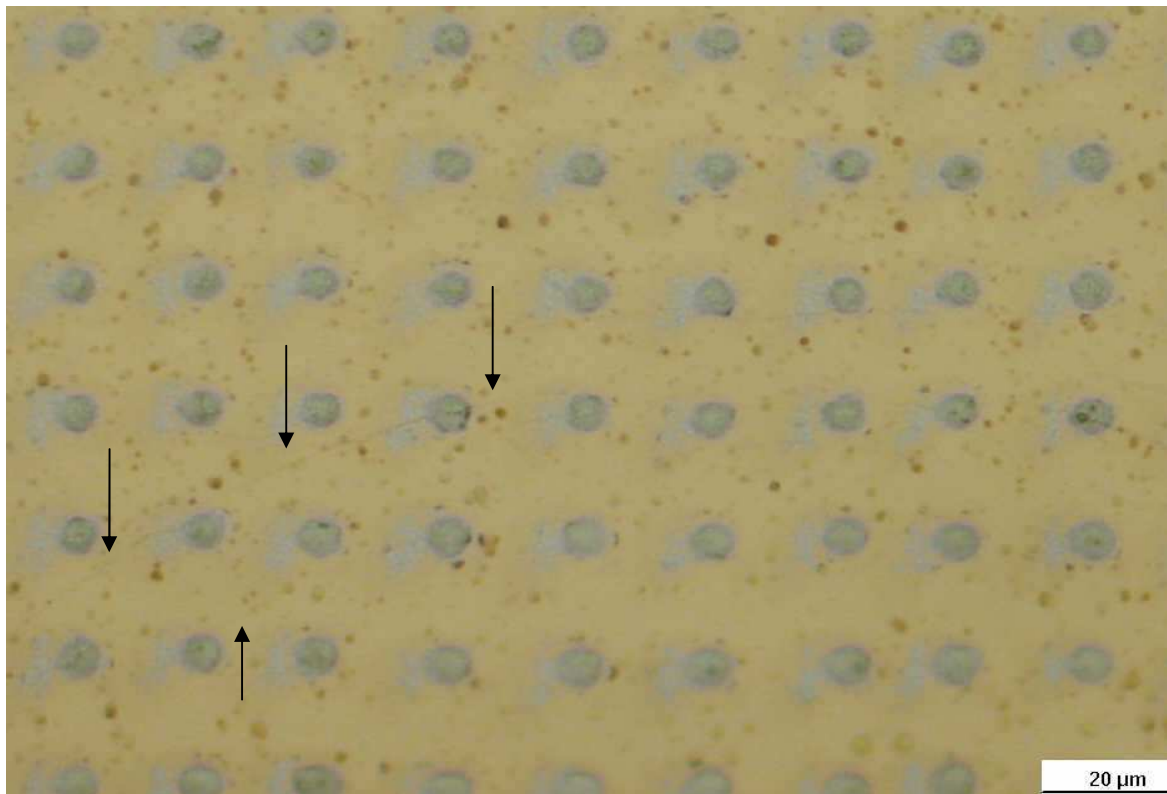


Figura 5.11: Aparición de grieta anillo en en sistema 10F+TiN+Láser , a la carga crítica.

Definimos como *límite monotónico* la carga máxima experimental por el sistema en la que no presenta daño.

Las cargas críticas para la aparición de dichas grietas anillo fueron determinadas para cada



sistema, utilizando un indentador esférico de 2,5 mm de diámetro. Midiendo las huellas remanentes, calculamos también la tensiones correspondientes a esta carga. Se calcularon estas tensiones con el radio de huella medido sin capa de oro.

Sistema	P_{crítica} (N)	Tensión (GPa)
10F + TiN	805	10.2
10F + TiN + Láser	807	10.5
10F + WC/C	1305	11.3
10F + WC/C + Láser	1304	11.0

Tabla 5.12: Carga crítica y tensión crítica de cada sistema.



5.2 Fatiga por contacto esférico

Los efectos sobre los sistemas observados en indentación esférica monotónica se acentúan bajo contacto esférico cíclico. Se propone ahora estudiar y caracterizar cuál es el efecto de la fatiga por contacto esférico en los dos sistemas texturados estudiados en este trabajo.

5.2.1 *Indentación por contacto esférico cíclico*

Para comprobar el efecto de la fatiga se han realizado ensayos partiendo de la carga crítica, y bajando su magnitud hasta que no hubiera daño. Se realizaron ensayos con un indentador de 2,5mm de diámetro disminuyendo la carga y aumentando el número de ciclos. Se puede apreciar en las secuencias de las tablas 5.13 y 5.14 la evolución del daño en los sistemas bajo cargas repetitivas por contacto esférico.



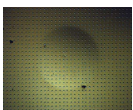
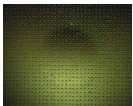
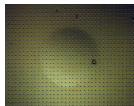
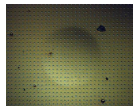

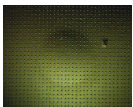
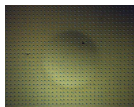
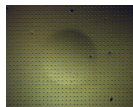
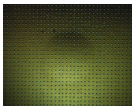
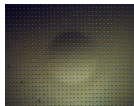
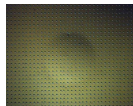
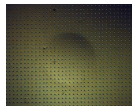
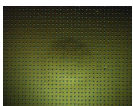
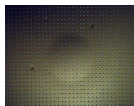
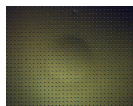
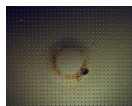

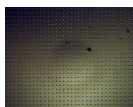
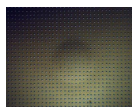

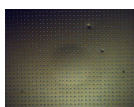
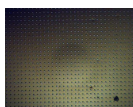
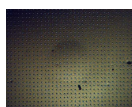
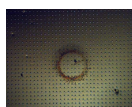
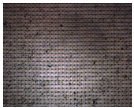

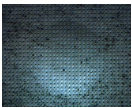
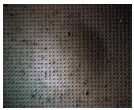
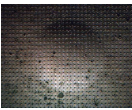
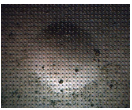
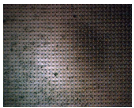


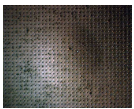

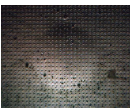
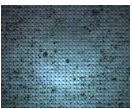
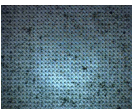
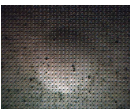

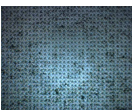
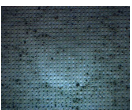

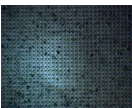
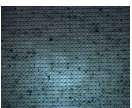
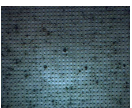

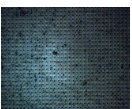
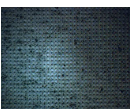
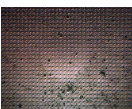
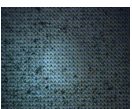
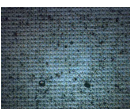

Carga	Monotonico	10^3 ciclos	10^4 ciclos	10^5 ciclos	10^6 ciclos
800N					
700N					
600N					
500N					
400N					
350N					
300N					

Tabla 5.13: Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+TiN+Láser



Carga	Monotonico	10^3 ciclos	10^4 ciclos	10^5 ciclos	10^6 ciclos
1300 N					
1200 N					
1100 N					
1000 N					
900 N					
800 N					
700 N					
600 N					
500 N					
400 N					



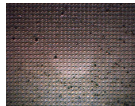
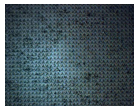
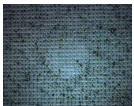

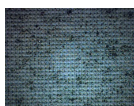
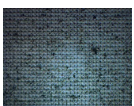

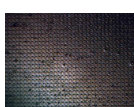



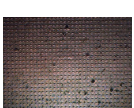
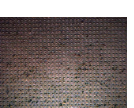
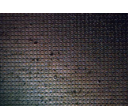
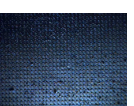
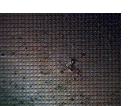
300 N					
200 N					
150 N					
100 N					
60 N					

Tabla 5.14: Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+WC/C+Láser

En las tablas 5.13 y 5.14 podemos identificar dos tipos de daño diferentes:

- Daño casi-plástico, el cual aumenta con el número de ciclos.
- Aparición de grietas anillo. Para una carga determinada por debajo de la carga crítica, al aumentar el número de ciclos se observa la emergencia de grietas anillo. Esto demuestra la sensibilidad a fatiga de estos sistemas.

5.2.2 Determinación de las curvas P vs N y p_0 vs N

En las curvas P-N de las figuras 5.15 a) y 5.15 b) se muestra la aparición de daño en los sistemas estudiados, entendido como el inicio de una grieta anillo, para valores dados de



carga y en función del número de ciclos.

En el sistema 10F+WC/C+Láser se aprecia una disminución abrupta entre el límite monotónico y el límite a fatiga en términos de carga, desde los 1300N hasta los 60N. En el caso del 10F+TiN+Láser, la disminución es más moderada.

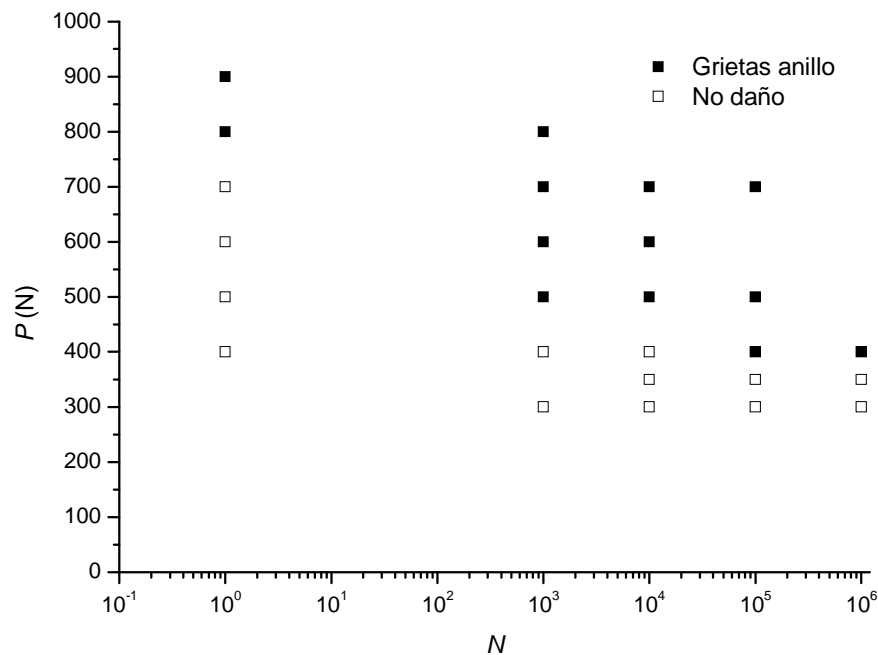


Figura 5.15 a) : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+TiN+Láser en términos de Carga frente a un número de ciclos.

En la figura 5.15 a) se presenta el límite a fatiga del sistema 10F+TiN+láser. Así para una carga de 350 N, no aparecen grietas anillo, para cualquier número de ciclos.



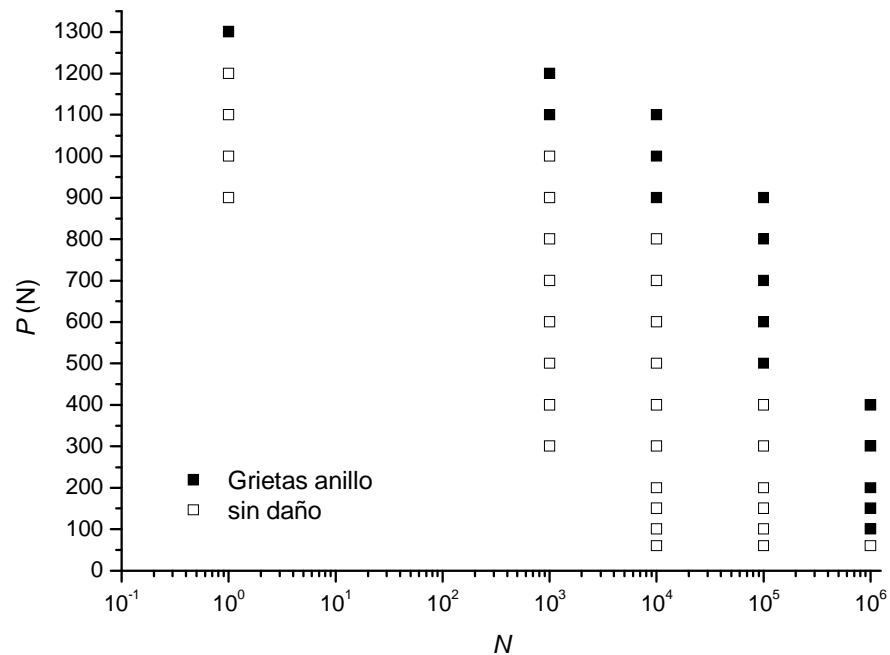


Figura 5.15 b) : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+WC/C+Láser en términos de Carga frente a un número de ciclos.

Por su parte, en la figura 5.15 b) se aprecia una disminución abrupta entre el límite monotónico y el límite a fatiga en términos de carga. El límite a fatiga es de 60 N para este sistema, lo que es extremadamente baja.

Para los dos sistemas estudiados, 10F+WC/C+Láser y 10F+TiN+Láser, se produce fisuración bajo sollicitaciones cíclicas a presiones aplicadas inferiores a P_0 correspondiente a la carga crítica, evaluada bajo indentación esférica monotónica. Además, las grietas anillo aparecen para valores de carga cada vez más pequeños al aumentar el número de ciclos.

En las figuras 5.16 a) y 5.16 b), se pueden observar la tensión media asociada a la huella producida para los valores de *carga vs número de ciclos*. Ésta se calcula a través de las huellas realizadas directamente sobre el sistema, sin capa de oro.

Los valores de tensión de las gráficas de la figura 5.16 se obtienen de la siguiente manera: la tensión para un valor dado de P y N será igual a la media de las tensiones para ese N



dato y el valor para un N previo (en escala logarítmica).

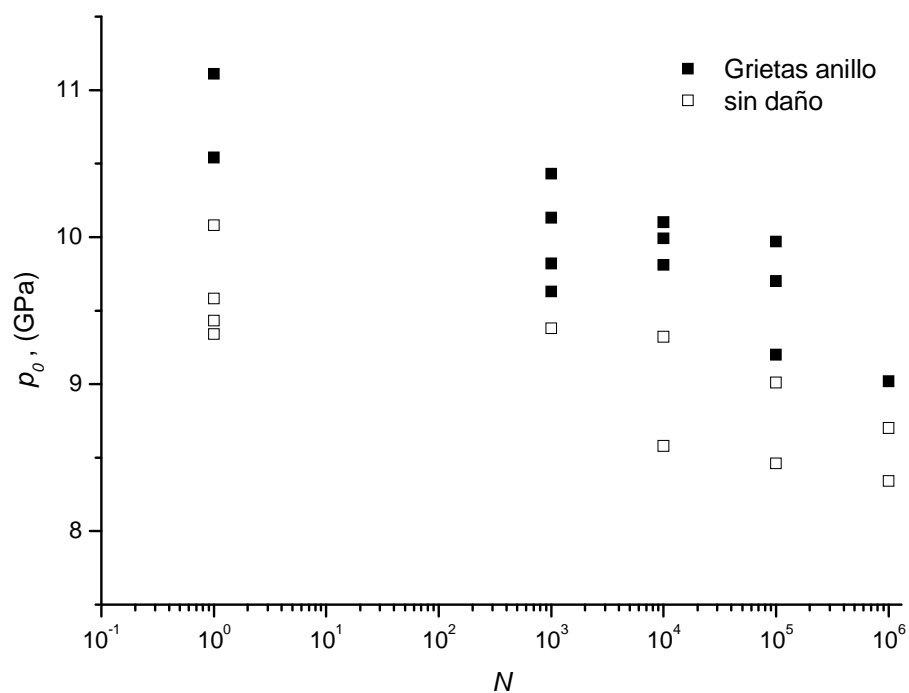


Figura 5.16 a) : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+TiN+Láser en términos de tensiones frente a un número de ciclos.



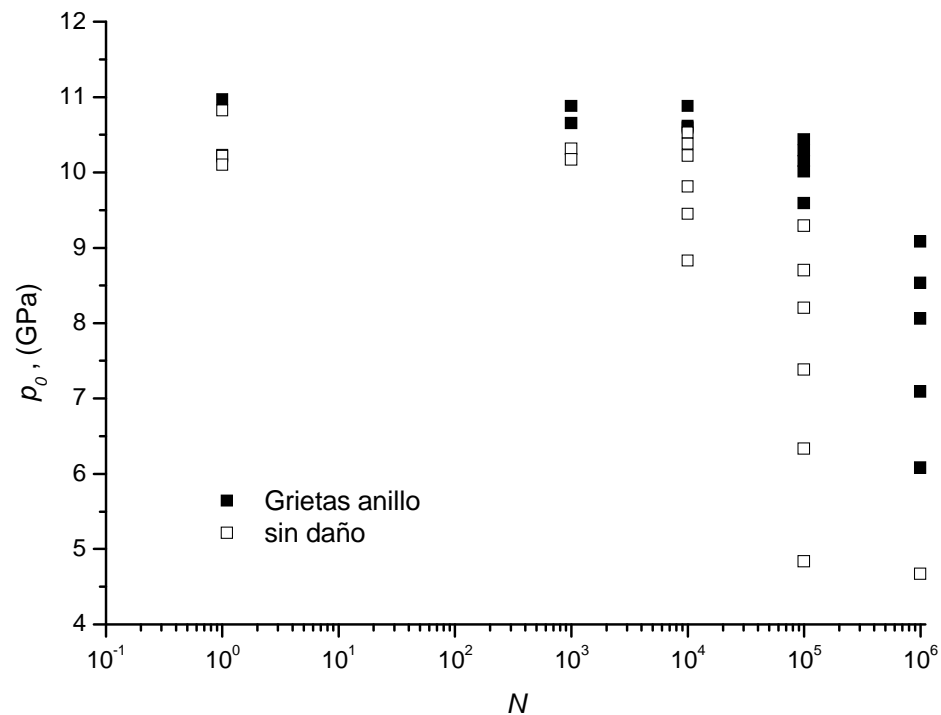


Figura 5.16 b) : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+WC/C+Láser en términos de tensiones frente a un número de ciclos.

En concordancia con los resultados en términos de carga, los resultados representados como tensiones muestran un límite a fatiga mucho más baja para el sistema 10F+WC/C+Láser. Este sistema muestra daño hasta tensiones de 6,1 GPa para 10⁶ ciclos, cuando el sistema 10F+TiN+láser muestra daño solo hasta 9 GPa para el mismo número de ciclos.

Tomando en consideración estudios previos, se ha establecido resultados de fatiga por contacto esférico sobre el sistema 10F+WC/C, sin textura superficial. Los resultados se muestran en la figura 5.17.



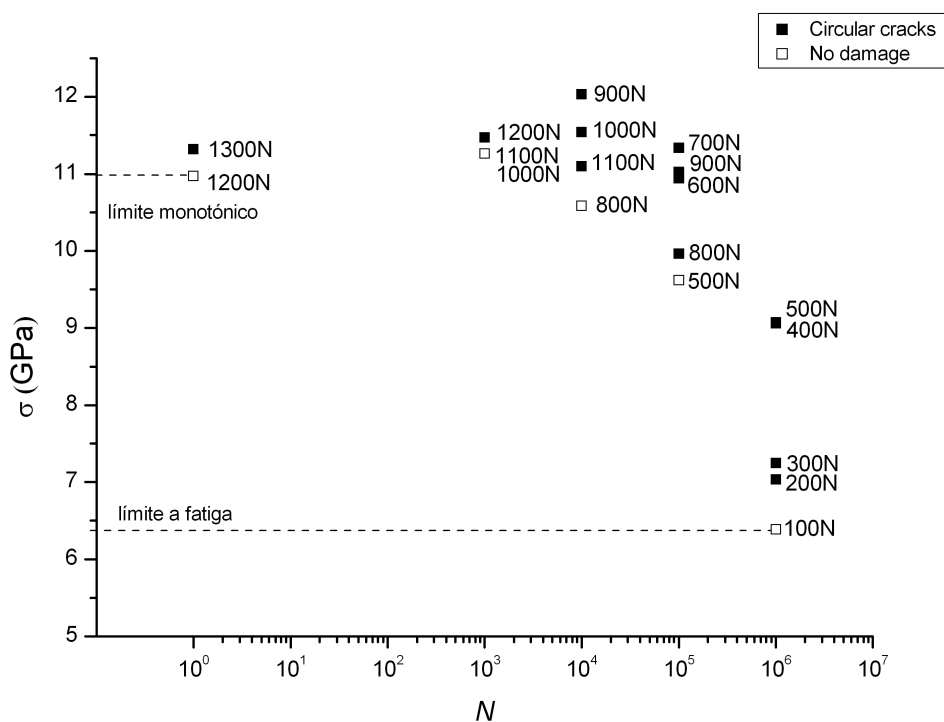


Figura 5.17 : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+WC/C en términos de tensiones frente a un número de ciclos. [12]

Aunque el comportamiento general del sistema 10F+WC/C+Láser bajo solicitaciones de fatiga por contacto esférico es bastante similar al mismo sistema sin textura superficial, la textura superficial parece inducir una disminución del límite a fatiga.



5.2.3 Determinación del límite a fatiga

Se define límite a fatiga como la carga máxima donde no se presenta daño para 10^6 ciclos entendido como la aparición de grietas anillo, con los mismos criterios de observación utilizados para los ensayos monotónicos. En la tabla 5.5 se muestran los valores de carga y tensión asociados al límite de fatiga para los sistemas 10F+TiN+Textura superficial y 10F+WC/C+Textura superficial respectivamente, ilustrados en las figuras 5.18 y 5.19.

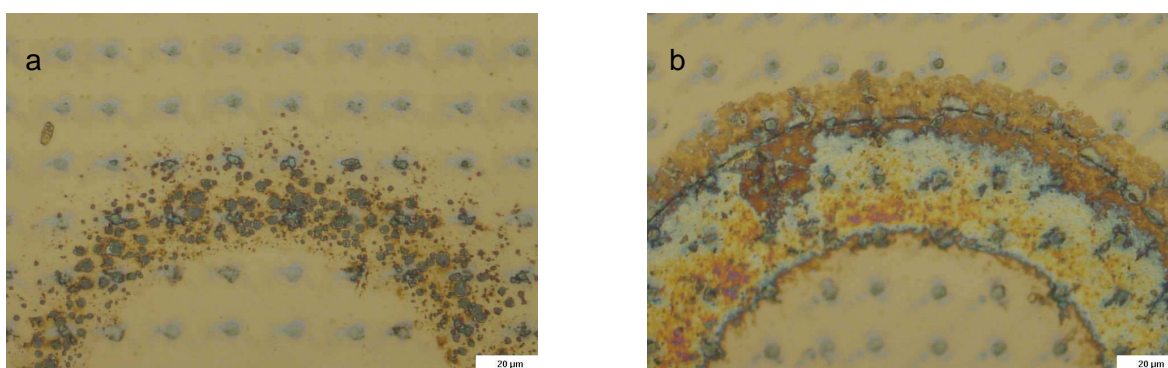


Figura 5.18 : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+TiN+textura superficial: a) 350 N 10^6 ciclos: No daño
b) 400 N 10^6 ciclos: Presencia de grietas anillo

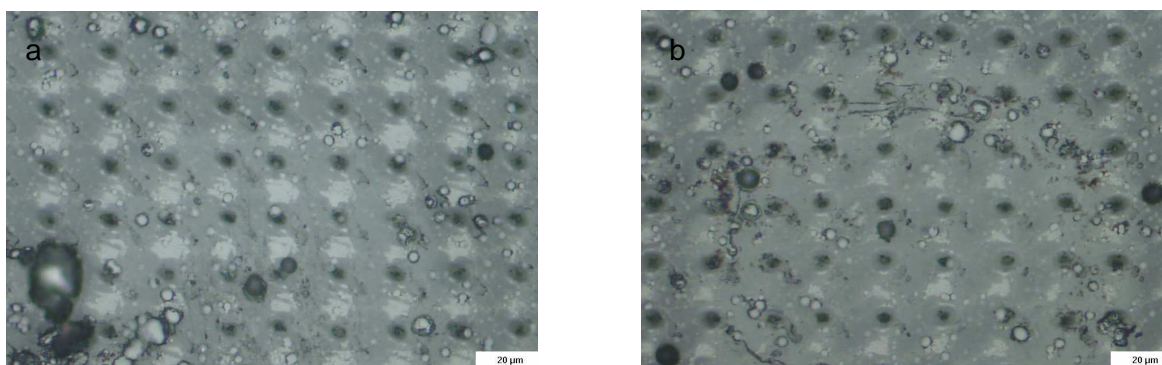


Figura 5.19 : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+WC/C+textura superficial: a) 60 N 10^6 ciclos: No daño
b) 100 N 10^6 ciclos: Presencia de grietas anillo



La tabla 5.5 reúne estos resultados.

Sistema	Límite a fatiga (N)	Límite a fatiga (GPa)
10F + TiN	350	8.6
10F + WC/C	100	6.4
10F + TiN + láser	350	8.7
10F + WC/C+ láser	60	4.8

Tabla 5.20 : Límite a fatiga de cada sistema, en términos de carga y de tensiones.

5.2.4 Determinación de la sensibilidad a fatiga

Sistema	Límite Monotónico	Límite a fatiga (GPa)	Sensibilidad a fatiga
10F + TiN	9.6	8.6	0.9
10F + WC/C	10.7	6.4	0.6
10F + TiN + láser	9.8	8.7	0.9
10F + WC/C+ láser	10	4.8	0.5

Tabla 5.21 : Sensibilidad a fatiga de cada sistema

En la tabla 5.21, se aprecia la sensibilidad a fatiga de cada sistema. Los sistemas recubiertos con WC/C son más sensibles a la degradación por sollicitaciones cíclicas. Este recubrimiento tiene que estar utilizado con cuidado, teniendo en cuenta su baja resistencia a fatiga, en comparación a los sistemas recubiertos con TiN.



Por otro lado, la textura superficial parece afectar muy poco la sensibilidad a fatiga de los sistemas.

Determinando el límite a fatiga, observando las huellas gracias a un microscopio óptico, se ha encontrado un otro tipo de daño sobre el sistema 10F+WC/C+Láser, independiente de las grietas anillo. Es un tipo de grietas circulares, presentes alrededor de las zonas térmicamente afectadas de las cavidades, y que se inician también en estas zonas.

Este tipo de daño puede existir en presencia de grietas anillo, o sin grietas anillo.

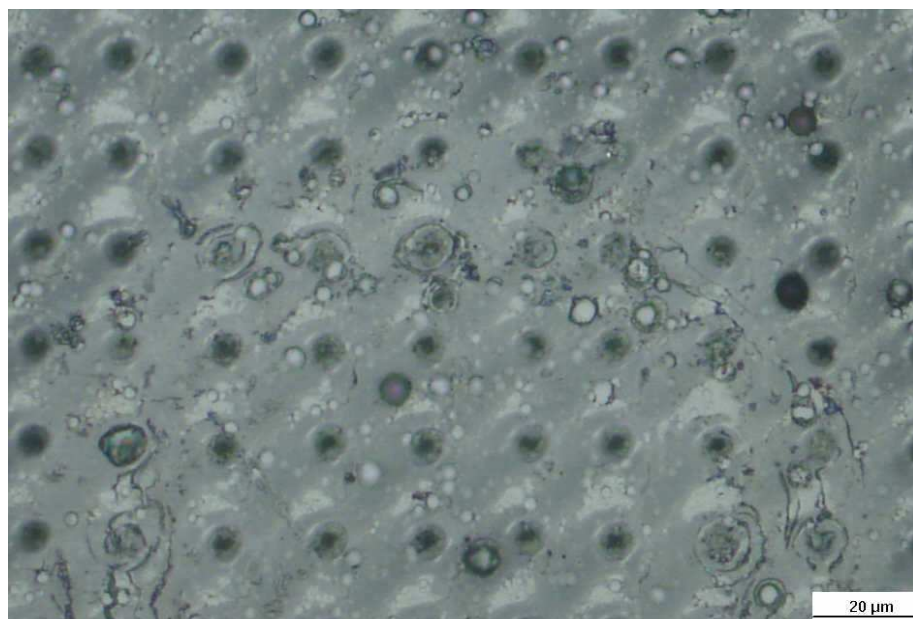


Figura 5.22: presencia de los dos tipos de daño sobre el sistema 10F+WC/C+Láser. Condiciones experimentales: 150N 10^6 ciclos.

Este tipo de daño solo aparece bajo ensayos de fatiga con un gran número de ciclos (10^5 o 10^6 ciclos) .

La presencia de este otro tipo de daño nos ha conducido a establecer otras gráficas de resultados de fatiga para este sistema, introduciendo tres estados de daño: no daño, daño en las ZAT y grietas anillo.

Las figuras 5.23 y 5.24 ilustran este fenómeno.



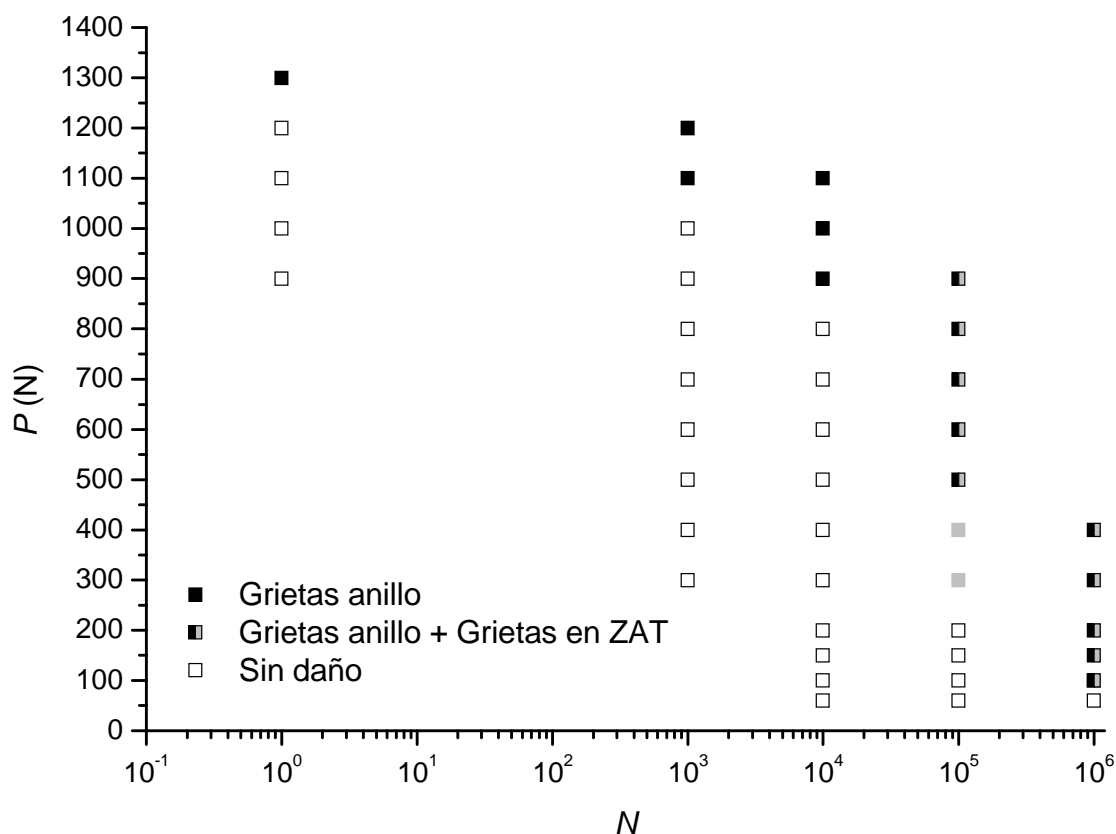


Figura 5.23 : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+WC/C+Láser en términos de Carga frente a un número de ciclos, con otro criterio.

Se aprecia la presencia de grietas iniciándose alrededor de las zonas térmicamente afectadas, para ensayos de gran número de ciclos. En la figura 5.24 se presentan los mismos resultados en términos de tensiones.



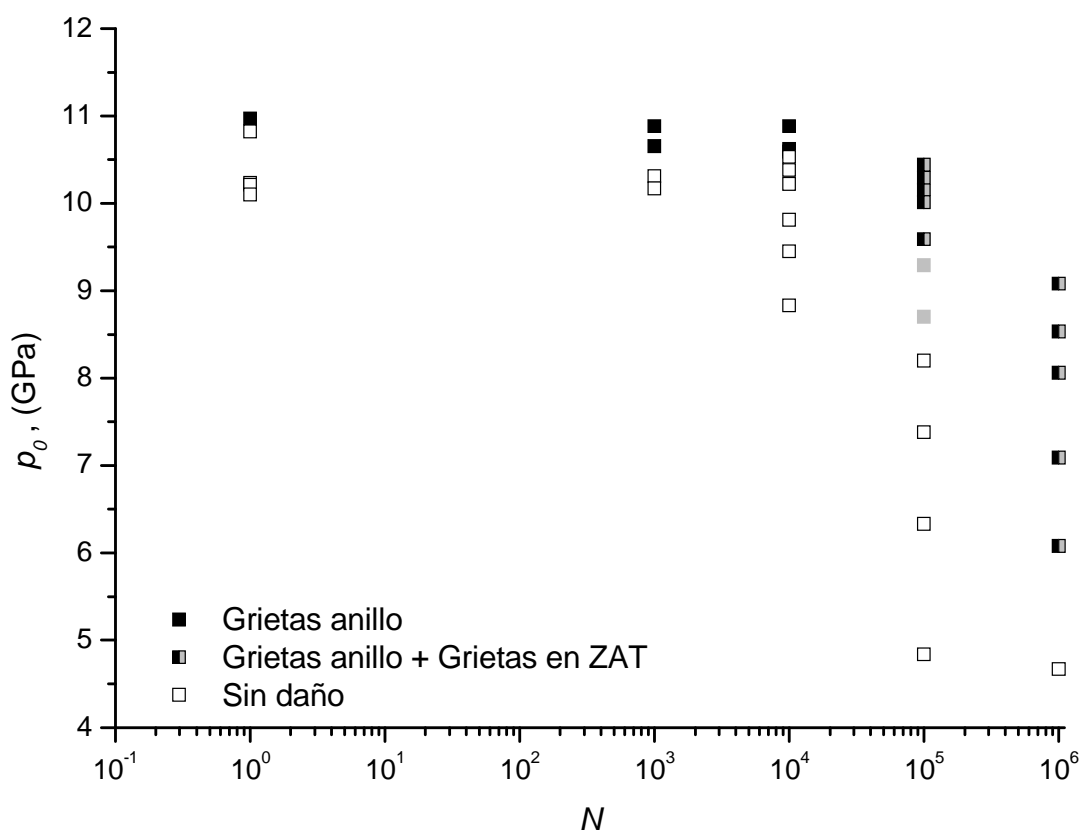


Figura 5.24 : Evolución del daño por contacto esférico cíclico en el sistema 10F+WC/C+Láser en términos de tensión frente a un número de ciclos, con otro criterio.



5.3 Tribología

Los ensayos de tribología, realizados sobre sistemas recubiertos sin textura superficial, nos han permitido proponer unas condiciones experimentales que sirvan para investigar estos sistemas y los texturados.

Dichas condiciones fueron difíciles de obtener, teniendo en cuenta la profundidad de desgaste durante los ensayos. Una carga demasiado elevada implica directamente una profundidad de desgaste superior al espesor del recubrimiento, lo que no permite conseguir resultados válidos desde el punto de vista de la película.

Las condiciones experimentales encontradas para investigar correctamente estos sistemas sin textura son:

- Velocidad de deslizamiento: 0,1 m/s
- Carga: 10 N
- Duración de ensayo: 3 horas
- Radio de pista: 10 mm

Se necesita naturalmente validar estas condiciones para investigar los sistemas texturados, y finalmente obtener resultados que sean comparables entre dichos sistemas.



6 Conclusiones

El objetivo de este estudio es analizar la respuesta mecánica bajo contacto esférico monotónico y cíclico de dos sistemas sustrato-recubrimiento.

Las curvas monotónicas que presentan los sistemas 10F+TiN y 10F+WC/C son similares a la del sustrato 10F. Esto indica que la presencia del recubrimiento cerámico en los sistemas “sustrato-recubrimiento” no afecta la respuesta al contacto del sustrato, como si fuera un material homogéneo.

Las curvas que presentan los sistemas 10F+TiN+Textura superficial y 10F+WC/C+Textura superficial son similares a las de los sistemas sin textura, lo que indica que la presencia de la textura superficial inducida por láser tampoco afecta significativamente la respuesta al contacto de los sistemas recubiertos. De este punto de vista, el recubrimiento WC/C muestra cierta tendencia a presentar cambios debido a la textura superficial.

De manera general, cada uno de estos sistemas presenta un límite elástico del orden de $1/3$ de la dureza del sustrato 10F. La textura superficial no afecta el límite elástico de los sistemas.

Considerando la aparición de una grieta circular como criterio de daño, se observa que cada uno de estos sistemas presenta fisuración a valores de presión similares.

Siempre considerando el mismo criterio de aparición de daño, todos los sistemas son sensibles a fatiga, lo cual se evidencia por la aparición de fisuras a presiones aplicadas por debajo de la carga crítica. En este trabajo, esta sensibilidad se hace más relevante para el caso de 10F+WC/C+Textura superficial donde este parámetro se reduce casi a la mitad.

Dado la utilización del mismo sustrato en cada uno de los sistemas, las diferencias relativas de respuesta de los sistemas recubiertos y texturados bajo sollicitaciones de fatiga deben ser asociadas a las composiciones de los recubrimientos cerámicos, o a los mecanismos de fallo de los recubrimientos. Estas diferencias pueden ser debidas a la calidad de la intercara entre el sustrato y el recubrimiento, a las tensiones residuales resultantes de la deposición de los recubrimientos, y/o a una combinación más compleja de estos factores con otros.

Las condiciones experimentales que servirán a investigar el comportamiento tribológico de estos sistemas son establecidas.



7 Agradacimientos

Me gustaría agradecer el apoyo de mi tutor Luis Miguel Llanes que me ha permitido realizar este proyecto dentro de su grupo de investigación.

Agradezco también la ayuda de los investigadores, y particularmente a la de Elena Tarrés, y la de los técnicos de laboratorio del grupo de Fatiga y Fractura, en especial la de Francesc Heredero por su disponibilidad.

Por último, me gustaría mencionar a las empresas Oerlikon Balzers-Elay S.A., Durit Ibérica S.L. y Tyco Electronics AMP S.A. por su contribución en el desarrollo de este proyecto.



8 Referencias bibliograficas

- [1] Gabriel Dumitru, Valerio Romano, Heinz P. Weber « *Precise microstructuring of tribological surfaces* », Proceedings of WhT Laser 2001, 351
- [2] G. Dumitru, B.Lüscher, M. Krack, S. Bruneau, J. Hermann, Y. Gerbig « *Laser processing of hardmetals: Physical basics and applications* »
- [3] R. Bantle, A. Matthews, "Investigation into the impact wear behaviour of ceramic coatings", *Surface and Coatings Technology* **74-75** (1995) 857-868
- [4] Brian R. Lawn " *Indentation of Ceramics with spheres: A Century after Hertz* " , J. Am. Ceram. Soc., 81 (1998)
- [5] T.V. Kononenko, S.V. Garnov, S.M. Pimenov, V.I. Konov, V. Romano, B. Borsos, H.P. Weber " *Laser ablation and micropatterning of thin TiN coatings.*" (Appl. Phys. A 71, 627-631 (2000))
- [6] G. Dumitru, V. Romano, H.P. Weber, H. Haefke, Y. Gerbig, E. Pflüger " *Laser microsturing of steel surfaces for tribological applications*" Appl. Phys. A 70 485-487 (2000)
- [7] G. Dumitru, V. Romano, H.P. Weber, H. Haefke and Y. Gerbig, " *Laser microstructuring of surfaces fo improving their tribological performance.*" Proceedings of SPIE Vol. 4157 (2001)
- [8] R. Bantle, A. Matthews, " *Investigation into the impact wear behaviour of ceramic coatings*", *Surface and Coatings Technology* **74-75** (1995) 857-868
- [9] E. Lugscheider , O. Knotek, C. Wolff, S. Ba"rwulf, "Structure and properties of PVD-coatings by means of impact tester", *Surface and Coatings Technology* 116–119 (1999) 141–146
- [10] K.-D. Bouzakis*, N. Vidakis, K. David, " *The concept of an advanced impact tester supported by evaluation software for the fatigue strength characterization of hard layered media*", *Thin Solid Films* 355-356 (1999) 322-32
- [11] M. Stoiber, M. Panzenbock, C. Mitterer C. Lugmair, " *Fatigue properties of Ti-based hard coatings deposited onto tool steels*", *Surface and Coatings Technology* **142_144** 2001 117_124
- [12] NIETO Javier, " *Comportamiento por ontacto esférico de dos sistemas con*



recubrimiento WC/C bajo cargas monotonicas y cíclicas.”, Proyecto final de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2007.



9 Anexos

9.1 Impacto medioambiental

El desarrollo del presente proyecto implica las siguientes actividades:

- Preparación metalográfica de las diferentes muestras a estudiar.
- Ensayos bajo contacto monotónico y cíclico.
- Ensayos de tribología
- Observación y medición mediante diferentes técnicas de microscopía de las probetas.
- Trabajo de investigación, análisis de resultados y ejecución.

En este contexto la valoración del impacto ambiental asociado a estas investigaciones se limitará al consumo de energía debida a la utilización de las diferentes máquinas de preparación y ensayo, a los materiales de las probetas y al tratamiento de los residuos derivados del uso del material de laboratorio necesario para la preparación de las muestras a analizar.

El consumo de energía asociado al uso de las máquinas se optimizó mediante planificación para reducir al máximo los procedimientos y ensayos suplementarios o innecesarios (tiempo de calentamiento, ensayos innecesarios...) Sin embargo el contacto por fatiga requiere ensayos muy prolongados en el tiempo necesitando muchas horas de funcionamiento y por consiguiente un gran consumo de energía. El funcionamiento del tribómetro también requiere una energía importante.

Las probetas que han sido utilizadas para la realización de los ensayos han sido un número muy reducido. Asimismo, una de las ventajas de la mecánica de contacto hertziana es la de necesitar muestras muy pequeñas en la experimentación, lo que supondrá menor cantidad de residuos durante la preparación de muestras, y por otro lado ha supuesto un menor consumo de energía y de emisiones de CO₂ para su obtención y fabricación.

Las operaciones de preparación metalográfica de las muestras requieren varios pasos, utilizando máquinas de pulido y diferentes accesorios. Con el fin de obtener el acabado de superficie deseado se emplean diferentes paños de pulido, lubricantes y pasta de diamante de calidades cada vez más finas. Tras la utilización de cada paño, estos son limpiados con agua. Las aguas sucias de pulido con partículas residuales de la probeta, pasta de



diamante y lubricante, se filtran mediante tamices, en la medida de lo posible. Sin embargo, los productos como el lubricante y las partículas de tamaño micrométrico no son filtrados y pasan a las canalizaciones.

Por otra parte los desechos procedentes del encastrado de las probetas se depositan en los recipientes de residuos generales, lo que impide una optimización del tratamiento de dichos desechos.

Para la limpieza de las diferentes probetas, se utilizan productos químicos como acetona y etanol que después de su uso, se introducen en unos determinados envases para su posterior reciclaje.



9.2 Coste general del proyecto

Concepto	Coste unitario	Cantidad	Subtotal (€)
Costes de las máquinas			
Pulidoras	10€/h	5h	50
Encastradora	10€/h	1h	10
Máquina de ensayos INSTRON 8511	25€/h	600h	15000
Microscopía óptica	20€/h	30h	600
Subtotal			15660€
Material de laboratorio			
Paños para la preparación metalográfica	150 €	3 ud	450
Pasta de diamante	30€/l	0,5l	15
Lubricante	50€/l	0,5l	25
Disolventes	2€/l	3l	6
Bolas indentación WC	2 €	30 ud	60
Subtotal			556€
Horarios personal especializado (5 meces)			
Ingeniero junior	12€/h	600h	7200
Ingeniero senior	30€/h	150h	6000
Jefe de proyecto	60€/h	10h	600
Técnicos de laboratorio	25€/h	30h	750
Subtotal			14550€
TOTAL DEL PROYECTO			30766€

Este proyecto, teniendo en cuenta los costes de funcionamiento de las máquinas, los del material de laboratorio, y los del personal calificado se sale a 30766 Euros, en 5 meces.

